

“VILLAROSA”

Progetto di impianto di accumulo idroelettrico

Comuni di Calascibetta, Enna e Villarosa (EN)

COMMITTENTE



COORDINAMENTO / MANDANTE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

PROGETTAZIONE GEOTECNICA /
MANDATARIA

GEODES



Progettista: Ing. Luisella Vai

Relazione descrittiva e di calcolo della galleria idraulica e delle gallerie di accesso

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	Luglio 22	VLDC-SP	LV	PAC

Codice commessa: 1388 Codifica documento: 1388-A-GD-R-03-0

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
3. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI	3
4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA.....	4
4.1 Caratterizzazione geologica.....	4
4.2 Caratterizzazione geotecnica.....	4
5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI.....	6
5.1 Galleria idraulica.....	6
5.1.1 Sezione tipo SGI1.....	6
5.2 Galleria di accesso al pozzo piezometrico	7
5.2.1 Sezione tipo SGPz1 e SGPz1*	7
5.3 Galleria di accesso alla centrale	8
5.3.1 Sezione tipo SGC1	9
5.3.2 Sezione tipo SGC2	10
5.3.3 Sezione tipo SGC3	11
5.3.4 Sezione tipo SGC-Imb.....	12
5.4 Materiali.....	14
6. GALLERIE DI ACCESSO: ANALISI NUMERICHE AGLI ELEMENTI FINITI.....	16
6.1 Generalità.....	16
6.2 Sezione tipo SGPz1.....	19
6.3 Sezione tipo SGPz1*	20
6.4 Sezione tipo SGC1	22
6.5 Sezione tipo SGC2	23
6.6 Sezione tipo SGC3	25
7. GALLERIE DI ACCESSO: VERIFICHE STRUTTURALI DEI SOSTEGNI	27
7.1 Approcci di calcolo.....	27
7.1.1 Verifiche dei rivestimenti delle gallerie	27
7.2 Sezione tipo SGPz1.....	29
7.2.1 Verifica del rivestimento di prima fase	29
7.2.2 Verifica del rivestimento definitivo.....	29
7.3 Sezione tipo SGPz1*	30
7.3.1 Verifica del rivestimento di prima fase	30
7.3.2 Verifica del rivestimento definitivo.....	31

7.4	Sezione tipo SGC1	33
7.4.1	Verifica del rivestimento di prima fase	33
7.4.2	Verifica del rivestimento definitivo	34
7.5	Sezione tipo SGC2	36
7.5.1	Verifica del rivestimento di prima fase	36
7.5.2	Verifica del rivestimento definitivo	37
7.6	Sezione tipo SGC1	39
7.6.1	Verifica del rivestimento di prima fase	39
7.6.2	Verifica del rivestimento definitivo	40
8.	GALLERIE DI ACCESSO: STABILITÀ DEL FRONTE	43
8.1	Stabilità dei fronti di scavo delle sezioni tipo	46
8.1.1	Sezione SGPz1	46
8.1.2	Sezione SGPz1*	47
8.1.3	Sezione SGC1	47
8.1.4	Sezione SGC2	48
9.	GALLERIA IDRAULICA: ANALISI TENSIO-DEFORMATIVE	50
9.1	Metodo convergenza-confinamento	50
9.2	Analisi con il metodo convergenza-confinamento	52
9.2.1	Analisi nella Argille Varicolori (AV)	53
9.2.2	Analisi nella Formazione di Terravecchia (TRVa)	56
9.2.3	Analisi nei Gessi (GTL2) appartenenti alla Serie Evaporitica	62

TABELLE

Tabella 4.1 - Parametri geotecnici Unità Geotecniche

Tabella 6.1 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (150 m profondità)

Tabella 6.2 - Caratteristiche geomeccaniche marne di Enna (200 m profondità)

Tabella 6.3 - Caratteristiche geomeccaniche formazione di Terravecchia (60 m profondità)

Tabella 6.4 - Caratteristiche geomeccaniche formazione di Terravecchia (300 m profondità)

Tabella 6.5 - Caratteristiche geomeccaniche Gessi (GTL2)

Tabella 7.1 - Coefficienti parziali delle azioni (Tabella 6.2.I NTC2018)

Tabella 7.2 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici (Tabella 6.2.II NTC2018)

Tabella 9.1 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

Tabella 9.1 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

Tabella 9.1 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

FIGURE

Figura 1.1 – Posizione dell'attuale vaso

Figura 5.1 - Profilo in asse galleria (riquadro azzurro)

Figura 5.2 – Sezione tipo SGI1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.3 - Profilo galleria (riquadro azzurro)

Figura 5.4 - Sezione tipo SGPz1 e SGPz1*: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.5 - Profilo galleria (riquadro azzurro)

Figura 5.6 - Sezione tipo SGC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.7 - Sezione tipo SGC2: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.8 - Sezione tipo SGC3: geometria del cavo e interventi di sostegno

Figura 5.9 - Sezione tipo SGC-lmb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

Figura 5.10 - Sezione tipo SGC-lmb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

Figura 6.1 - Sezione tipo SGPz1: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.2 - Sezione tipo SGPz1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 6.3 - Sezione tipo SGPz1*: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.4 - Sezione tipo SGPz1*: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 6.5 - Sezione tipo SGC1: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.6 - Sezione tipo SGC1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 6.7 - Sezione tipo SGC2: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.8 - Sezione tipo SGC2: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 6.9 - Sezione tipo SGC3: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

Figura 6.10 - Sezione tipo SGC3: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

Figura 7.1 - Sezione tipo SGPz1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.2 - Sezione tipo SGPz1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.3 - Sezione tipo SGPz1*: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.4 - Sezione tipo SGPz1*: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.5 - Sezione SGPz1*: Andamento delle tensioni di di taglio

Figura 7.6 - Sezione tipo SGC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Figura 7.7 - Sezione tipo SGC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

Figura 7.8 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio

- Figura 7.9 - Sezione tipo SGC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase
- Figura 7.10 - Sezione tipo SGC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 7.11 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio
- Figura 7.12 - Sezione tipo SGC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase
- Figura 7.13 - Sezione tipo SGC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo
- Figura 7.14 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio
- Figura 8.1 – Stabilità del fronte metodo di Anagnostou & Kovari (1996)
- Figura 8.2 – Schema geometrico e forze agenti metodo di Anagnostou & Kovari (1996)
- Figura 8.3 – Schema di calcolo della forza applicata dall'elemento al fronte
- Figura 9.1 – Metodo convergenza-confinamento: curva caratteristica della galleria (LC), del sostegno ipotizzato perfettamente elastico (LS1) e del sostegno ipotizzato elastico perfettamente plastico (LS2)
- Figura 9.2 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=50m)
- Figura 9.3 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=50m)
- Figura 9.4 Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=115m)
- Figura 9.5 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=115m)
- Figura 9.4 Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=200m)
- Figura 9.5 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=200m)
- Figura 9.8 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=30m)
- Figura 9.9 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=30m)
- Figura 9.10 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=60m)
- Figura 9.11 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=60m)
- Figura 9.12 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=100m)
- Figura 9.13 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=100m)
- Figura 9.14 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=135m)
- Figura 9.15 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=135m)
- Figura 9.16 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=200m)
- Figura 9.17 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=200m)
- Figura 9.18 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=300m)
- Figura 9.19 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=300m)

Figura 9.20 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (GTL2 - Z=300m)

Figura 9.21 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (GTL2 - Z=300m)

1. INTRODUZIONE

La presente relazione di calcolo è stata redatta per conto di FROSIO NEXT S.r.l. nell'ambito del progetto di autorizzazione dell'impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio puro tra l'attuale invaso di Villarosa (diga di Morello) ed un bacino artificiale di nuova realizzazione, sempre in comune di Villarosa (EN) (Figura 1.1).

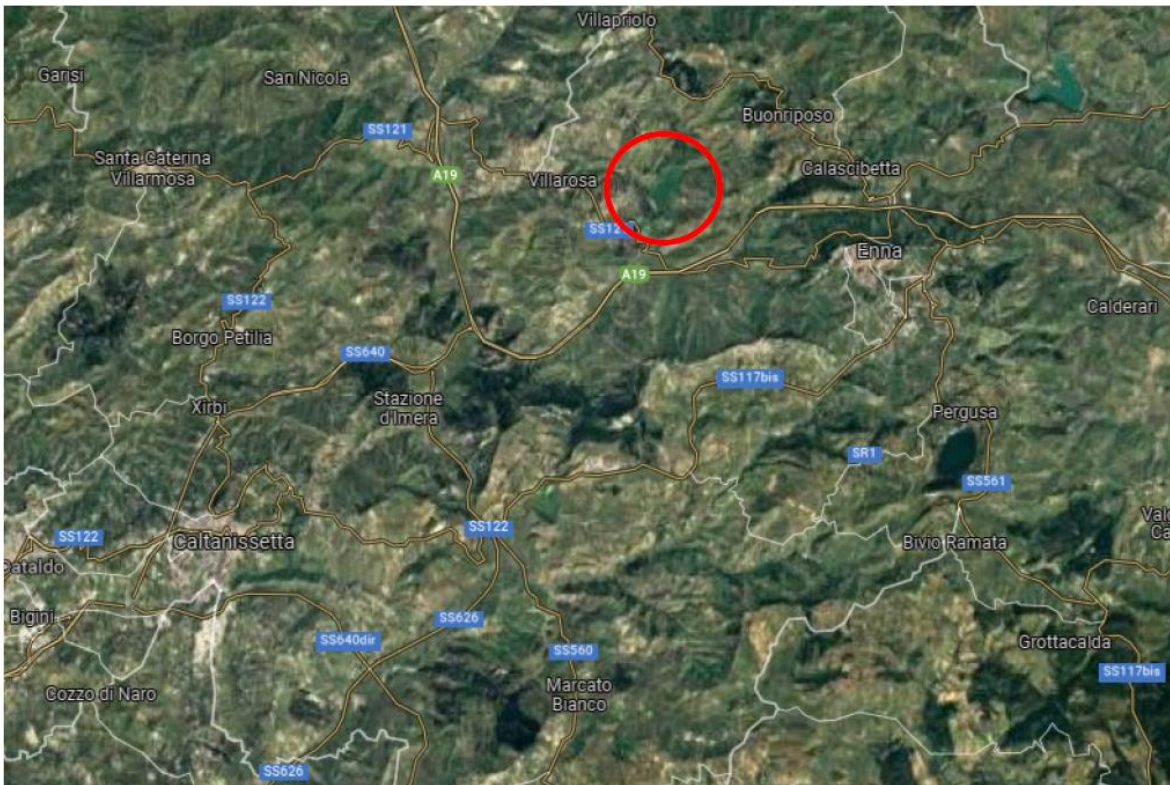


Figura 1.1 – Posizione dell'attuale invaso

La presente relazione ha lo scopo di illustrare la metodologia di dimensionamento e verifica dei rivestimenti dei cavi in progetto.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento per i calcoli e le verifiche è costituita da:

- D.M. 17 gennaio 2018 “Norme tecniche per le costruzioni” - NTC 2018
- Circolare 11 febbraio 2019, n. 617/C.S.LL.PP.

3. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

I programmi di calcolo utilizzati per le analisi e le verifiche delle sezioni tipo sono:

- Rocscience Inc. - Phase2 Versione 8.024
- Rocscience Inc. – RocSupport Versione 2.0
- Midas Information Technology - MidasGen 2020

Tutti i software sono largamente impiegati a livello globale e di comprovata validità nella progettazione geotecnica e strutturale.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA

Il presente capitolo riporta un breve inquadramento dal punto di vista geologico, geotecnico e sismico relativo alle zone in cui risultano ubicate le diverse opere in sottterraneo. Per una trattazione più esaustiva si rimanda ai seguenti elaborati:

- 1388-A-CT-R-01 - Relazione geologica generale
- 1388-A-GD-R-01 - Relazione geotecnica generale.

4.1 Caratterizzazione geologica

Dalla planimetria geologica e dalle sezioni geologiche interpretative, riportate negli allegati della *Relazione geologica generale*, è possibile osservare che:

- lo scavo della galleria idraulica interesserà le Argille Varicolori (AV), la formazione di Terravecchia (TRVa) ed i Gessi (GTL2) ed in minima parte il calcare di base (GTL1) appartenente alla Serie Evaporitica
- lo scavo della galleria di accesso alla centrale interesserà la formazione di Terravecchia (TRVa) ed i Gessi (GTL2)
- lo scavo della galleria di accesso al pozzo piezometrico, che si diparte dalla galleria di accesso alla centrale, interesserà la formazione di Terravecchia (TRVa), in minima parte i Gessi (GTL2) e le Marne di Enna (ENNa)

4.2 Caratterizzazione geotecnica

Le diverse unità geologiche illustrate al paragrafo precedente sono state caratterizzate da un punto di vista geotecnico al fine di determinare le caratteristiche fisiche e le proprietà meccaniche di resistenza e deformabilità utili per lo svolgimento dei calcoli di progetto.

La caratterizzazione delle diverse unità geotecniche è stata effettuata basandosi sui dati finora raccolti durante le campagne di indagini preliminari per i litotipi campionati e basandosi su dati di letteratura per le formazioni non direttamente riscontrate nella campagna di indagine. Per ulteriori approfondimenti si fa riferimento alla relazione Geotecnica generale 1388-A-GD-R-01.

Le proprietà geotecniche assunte in sede di progetto, per ciascuna unità, sono riassunte nel seguito, ovviamente tali parametri dovranno essere confermati nelle successive fasi di progettazione da ulteriori indagini volte a caratterizzare in maniera più rigorosa i litotipi presenti in sito:

Tabella 4.1 - Parametri geotecnici Unità Geotecniche

Litotipo			Argille Varicolori (AV)	Terravecchia (TRVa)	Marne di Enna (ENNa)	Gessi (GTL2)
peso di volume	γ	kN/m ³	18 – 22	19 – 21	24	21
Criterio Mohr-Coulomb	c'	kPa	18 – 100	24 – 100	-	-
	ϕ'	°	20 - 40	17 – 26	-	-
Criterio Hoek-Brown	σ_{ci}	MPa	-	-	20	20
	GSI	.	-	-	55	50
	m_i	.	-	-	4	8
	D	.	-	-	0	0
	m_b	.	-	-	0.802	1.341
	s	.	-	-	0.0067	0.0039
	α	.	-	-	0.504	0.506
Coeff. di Poisson	ν	.	0.30	0.30	0.30	0.30
Modulo elastico roccia intatta	E_i	MPa	-	-	5000	19000
Rapporto modulo	MR	.	-	-	250	950
Modulo elastico	E	MPa	25 - 1485	30 - 700	2041.4	5836.5

5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI

Nel presente capitolo si riporta una breve descrizione delle sezioni tipologiche previste per garantire un adeguato sostegno del cavo sia in fase di esecuzione che in fase di utilizzo. Ulteriori dettagli sono riportati sugli elaborati grafici di progetto.

5.1 Galleria idraulica

La galleria idraulica, come mostrato nell'immagine seguente, ha origine al di sotto del bacino di monte ed è collegata con quest'ultimo per mezzo di un pozzo verticale che costituisce l'opera di presa dell'impianto, prosegue quindi orizzontalmente per circa 50 m prima della caverna contenente la centrale idroelettrica e successivamente per circa 100 m fino a giungere al pozzo piezometrico.

Dal pozzo piezometrico la galleria idraulica prosegue per un primo tratto di circa 2910 m con pendenza intorno all'1.8% ed un secondo tratto di circa 1383 m, con pendenza nulla, fino al raggiungimento del lago di valle.

Superata la centrale in caverna la via d'acqua prosegue fino all'opera di presa di valle senza alcuna blindatura metallica, pertanto la pressione esercitata dal battente idraulico durante la fase di utilizzo dovrà essere interamente assorbita dal rivestimento della galleria stessa, il quale dovrà garantire la stabilità del cavo nei confronti delle forze esterne ed interne, sia durante la fase di scavo sia durante la fase di esercizio.

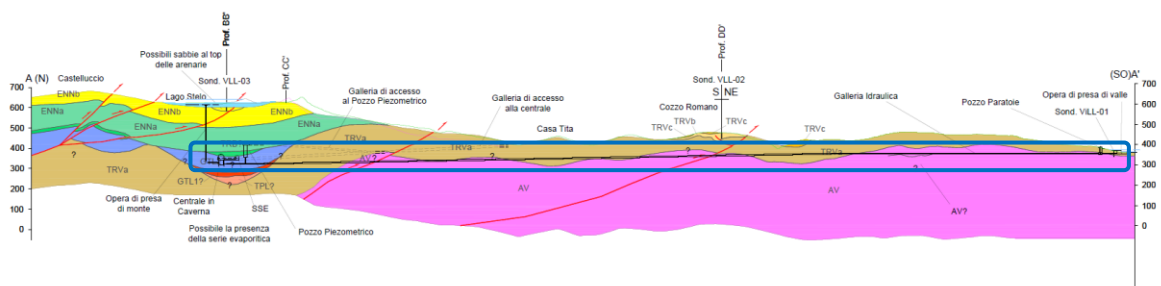


Figura 5.1 - Profilo in asse galleria (riquadro azzurro)

5.1.1 Sezione tipo SG11

La sezione tipo SG11 (Figura 5.2) è prevista per la totalità della galleria idraulica nel tratto compreso tra la centrale in caverna e l'opera di presa di valle.

La stabilità del cavo sarà assicurata mediante un rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo armato di classe C30/37 dello spessore di 30 cm.

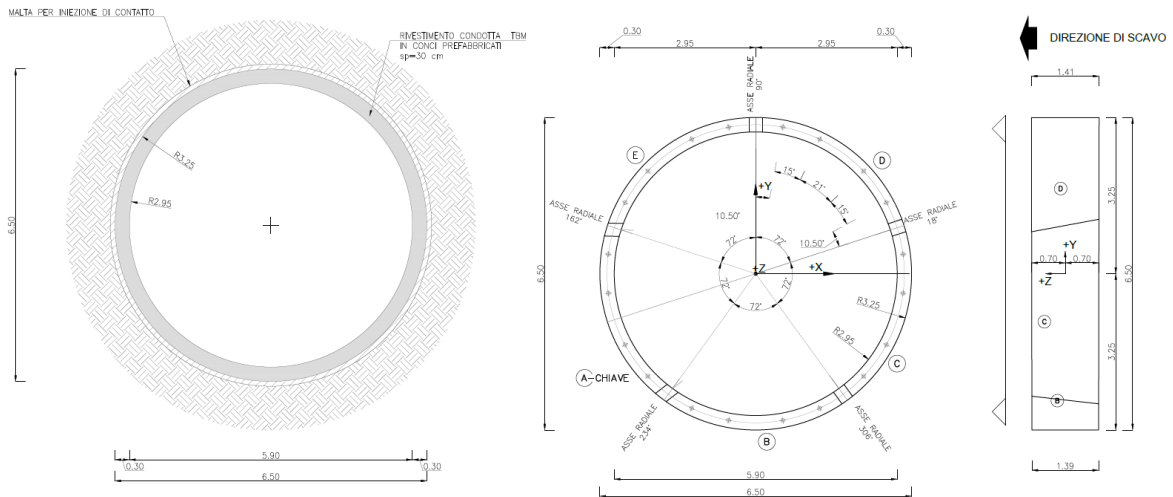


Figura 5.2 – Sezione tipo SG1: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.2 Galleria di accesso al pozzo piezometrico

La galleria di accesso al pozzo piezometrico si dirama con pendenza variabile, per una lunghezza di circa 665 m, dalla galleria di accesso alla caverna della centrale dopo circa 610 m dall'imbocco fino a giungere in sommità alla camera del pozzo piezometrico (Figura 5.3).

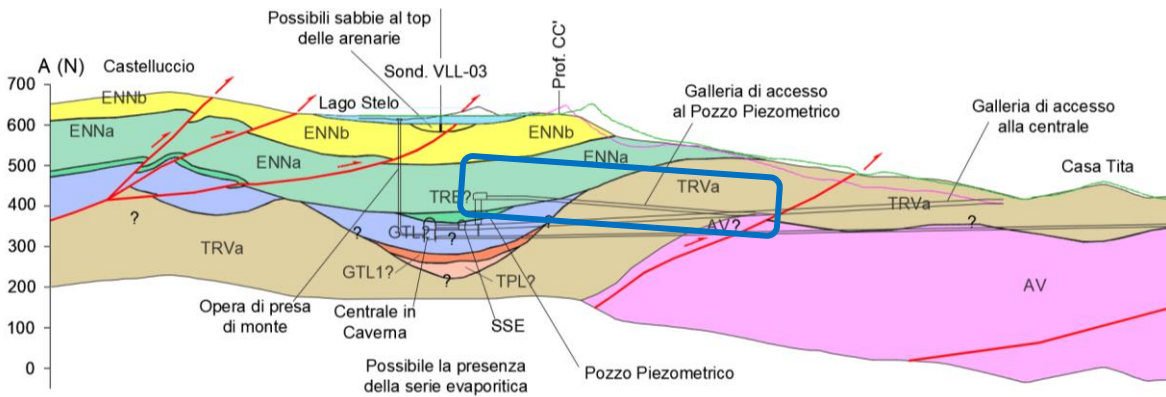


Figura 5.3 - Profilo galleria (riquadro azzurro)

La differenza tra le due sezioni tipo è data dal quantitativo di armatura necessaria ad assorbire le tensioni agenti nel rivestimento definitivo, mentre il rivestimento di prima fase rimane il medesimo come lo spessore del rivestimento definitivo.

5.2.1 Sezione tipo SGPz1 e SGPz1*

La sezione tipo SGPz1 (Figura 5.4) è prevista per tutto il tratto scavato nella formazione di Terravecchia TRVa, mentre la sezione tipo SGPz1* è prevista per il tratto scavato all'interno delle Marne di Enna (ENNa).

Il rivestimento di prima fase per entrambe le sezioni tipo sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37. Le due sezioni tipo differiscono unicamente per le incidenze di armatura necessarie al superamento delle verifiche strutturali.

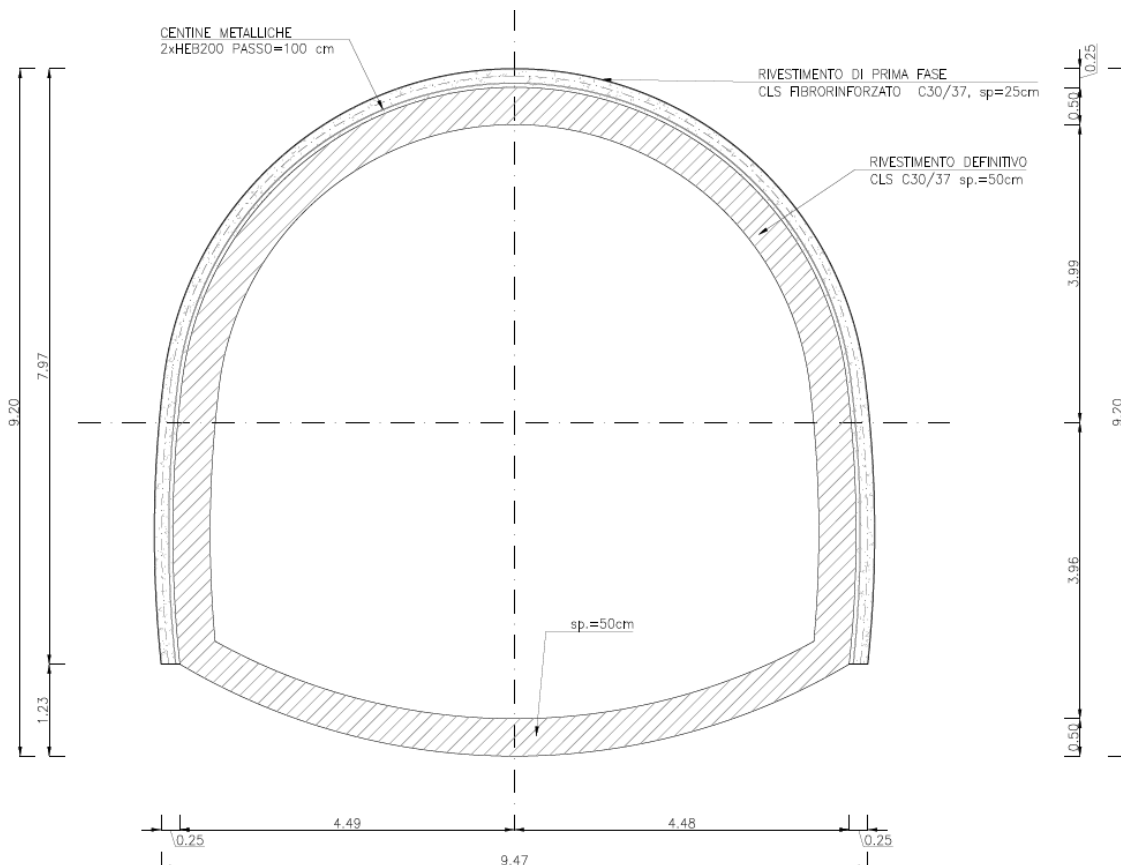


Figura 5.4 - Sezione tipo SGPz1 e SGPz1*: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.3 Galleria di accesso alla centrale

La galleria di accesso alla centrale ha l'imbocco al piazzale di cantiere e andamento altimetrico discendente con pendenza attorno l'8%, per una lunghezza totale di 1500 m circa (Figura 5.5).

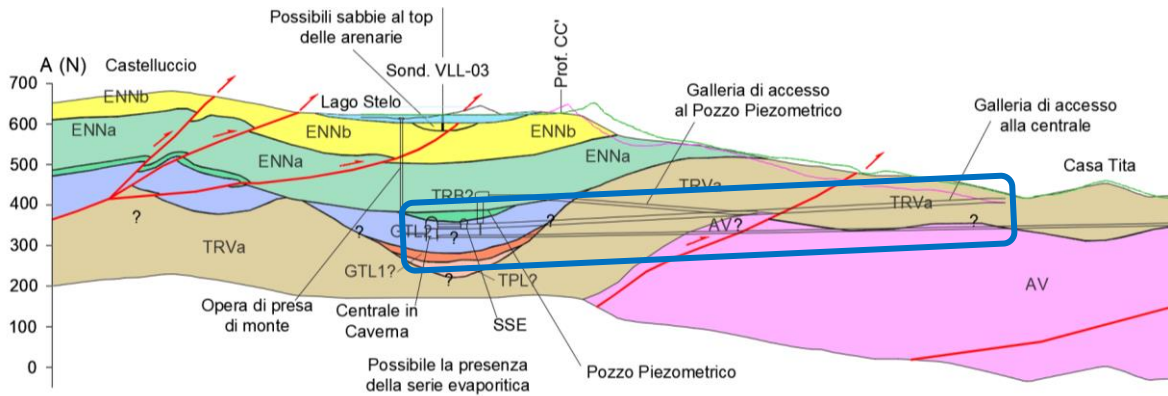


Figura 5.5 - Profilo galleria (riquadro azzurro)

5.3.1 Sezione tipo SGC1

La sezione tipo SGC1 (Figura 5.6) è prevista per la maggior parte del tracciato scavato nella formazione di Terravecchia (TRVa), dove la copertura va da bassa a media (<100 m).

Il rivestimento sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

Sul fronte di scavo è previsto un consolidamento con barre VTR di lunghezza 24 m e sovrapposte per 12 m, iniettate con miscela cementizia, per un totale di 50.

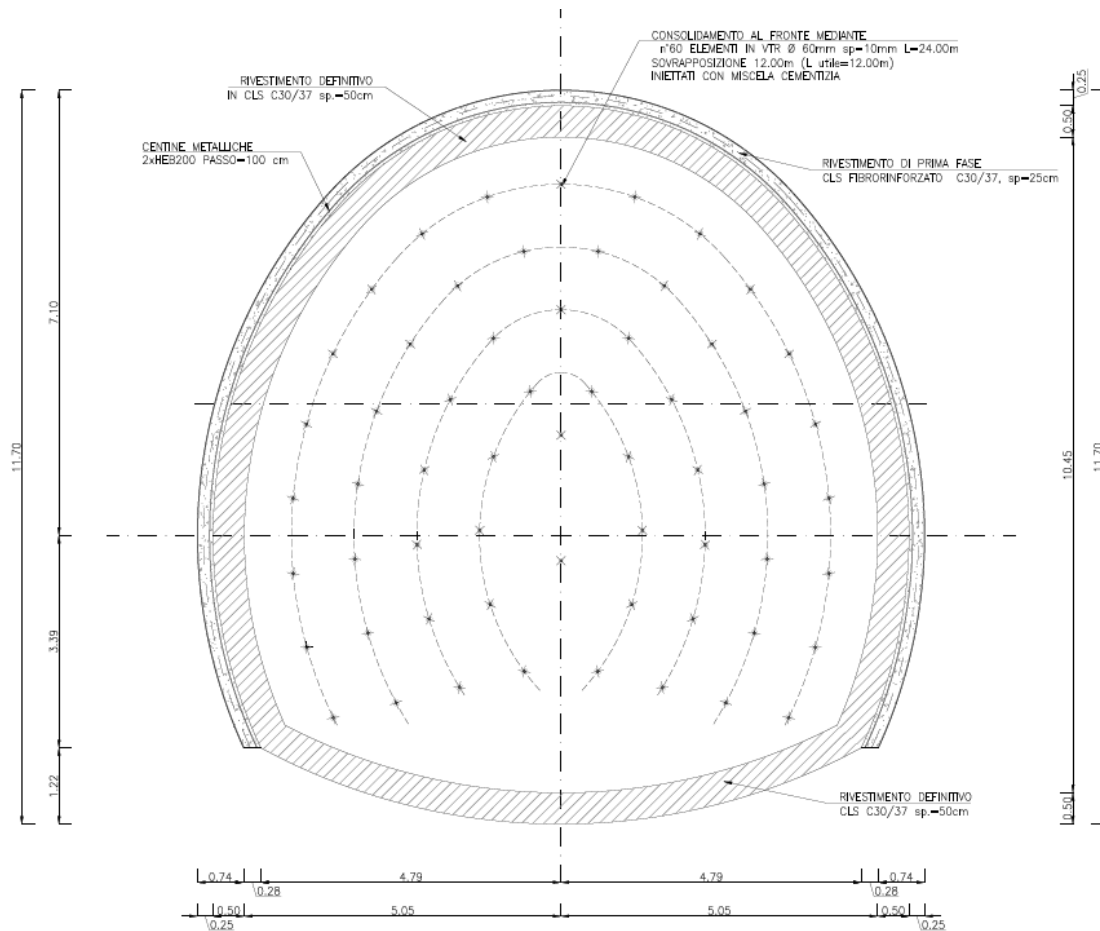


Figura 5.6 - Sezione tipo SGC1: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.3.2 Sezione tipo SGC2

La sezione tipo SGC2 (Figura 5.7) è prevista nel tratto scavato all'interno della formazione di Terravecchia per coperture superiori a 100 m.

Il rivestimento sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 60 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

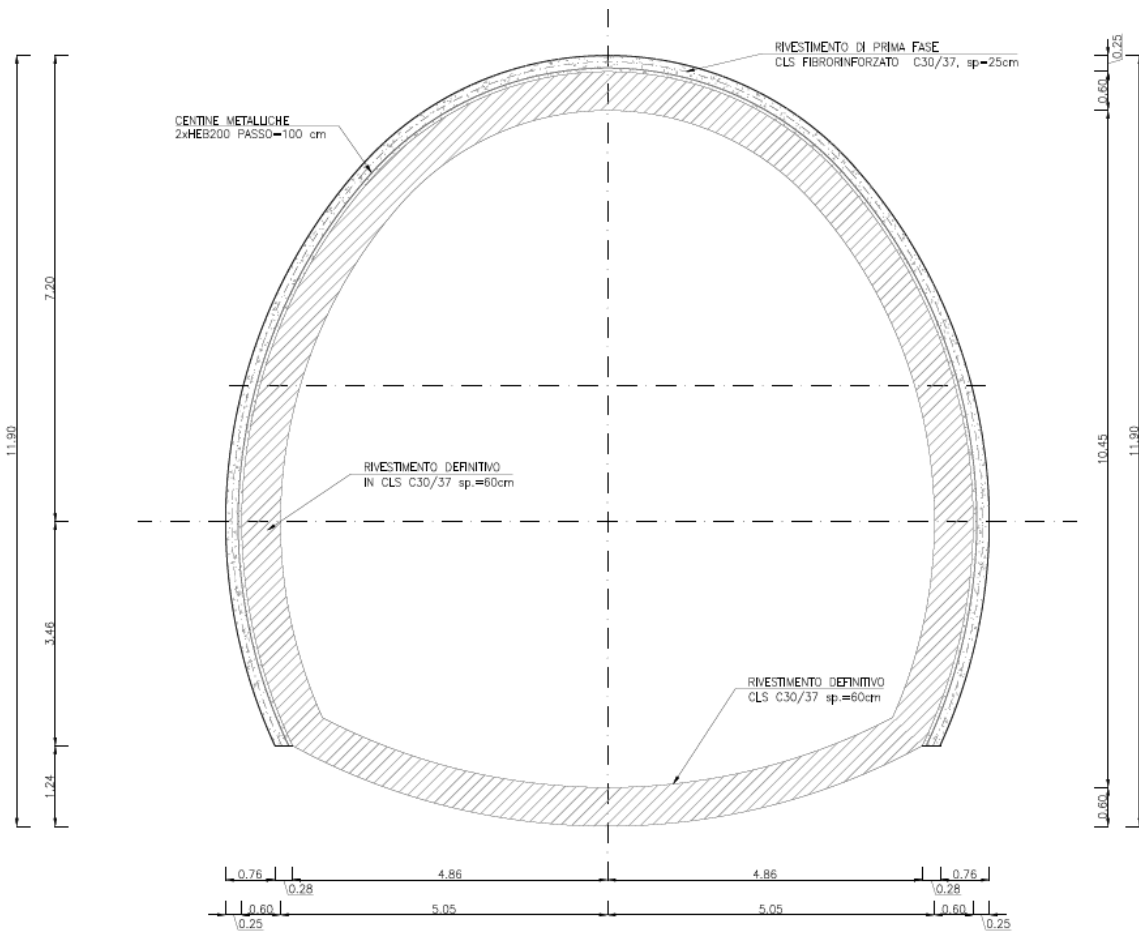


Figura 5.7 - Sezione tipo SGC2: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.3.3 Sezione tipo SGC3

La sezione tipo SGC3 (Figura 5.8) è prevista per il tratto scavato all'interno dei Gessi (GTL2).

Il rivestimento sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrinforzato di classe C30/37 e centine accoppiate HEB200 con passo 1 m.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

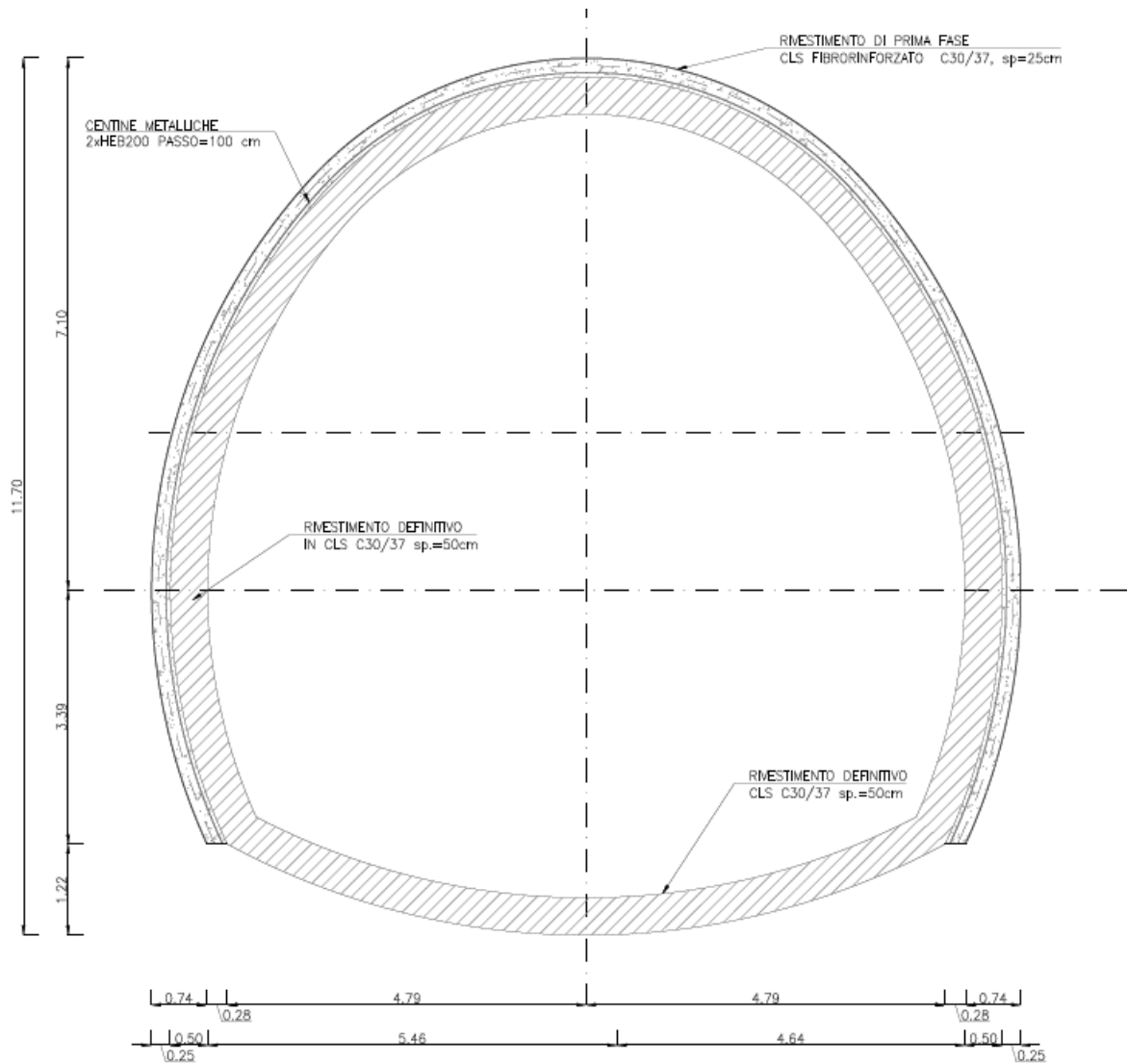


Figura 5.8 - Sezione tipo SGC3: geometria del cavo e interventi di sostegno

5.3.4 Sezione tipo SGC-Imb

Per la realizzazione dell'imbocco della galleria di accesso alla centrale si prevede di impiegare la sezione tipologica SGC-Imb (Figura 5.9 e 5.10). Per garantire la stabilità del cavo in condizioni di bassissima copertura, si prevede di rinforzare il contorno di scavo, mediante un ombrello di tubi metallici in calotta.

Il rivestimento di prima fase sarà dunque costituito da uno strato di 25 cm di calcestruzzo proiettato fibrorinforzato di classe C30/37.

A completamento della galleria si procederà con il getto del rivestimento definitivo dello spessore variabile tra 50 cm ad inizio campo e 98 cm a fine campo, da realizzarsi con calcestruzzo armato di classe C30/37.

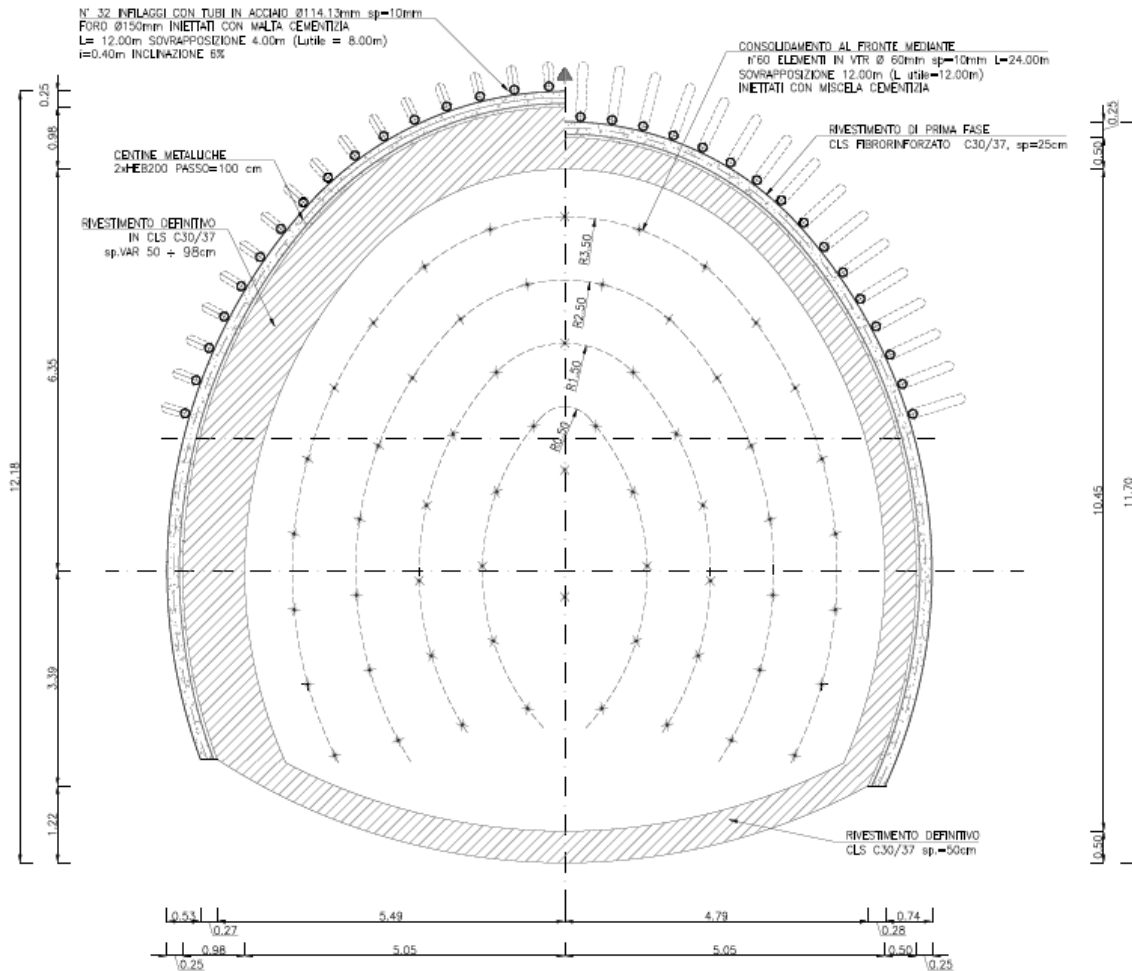


Figura 5.9 - Sezione tipo SGC-lmb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione trasversale

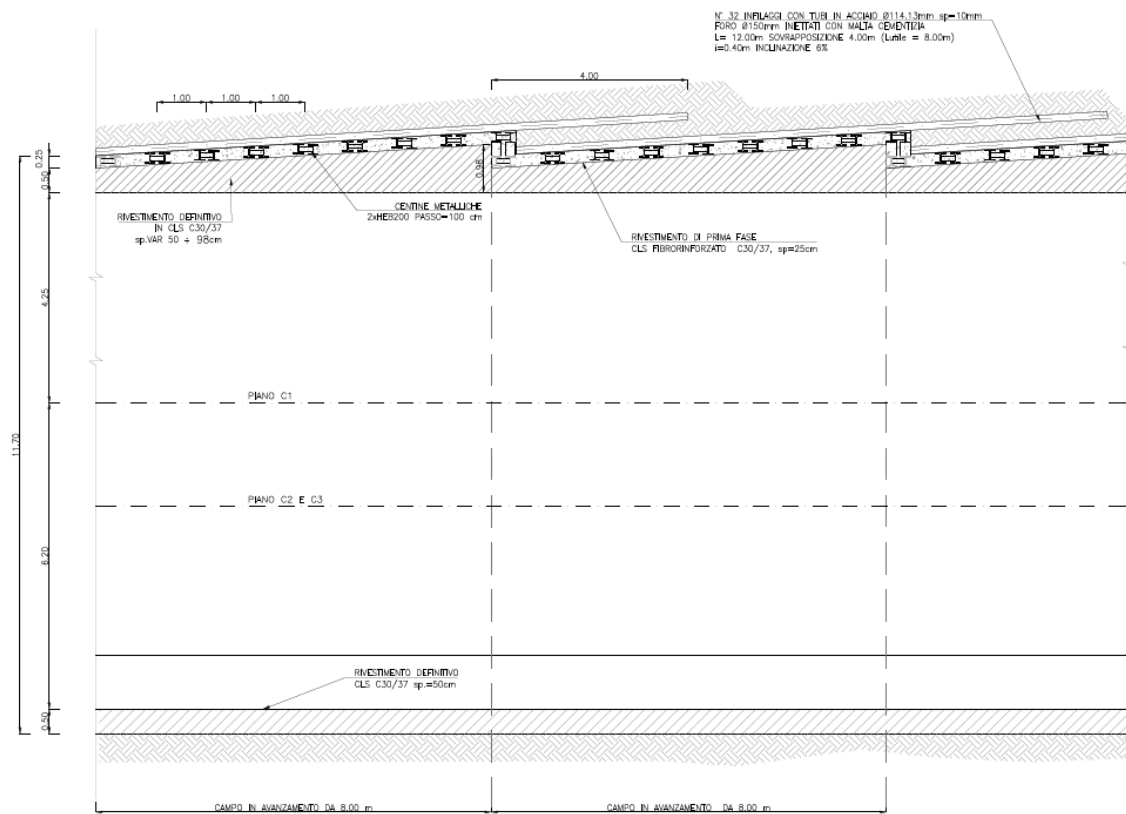


Figura 5.10 - Sezione tipo SGC-Imb: geometria del cavo e interventi di sostegno, sezione longitudinale

5.4 Materiali

I materiali che costituiscono le opere di sostegno sono definiti di seguito:

Calcestruzzo per conci prefabbricati

classe di resistenza

C 30/37

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$$

$$f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$$

modulo elastico

$$E = 32800 \text{ MPa}$$

Calcestruzzo proiettato fibrorinforzato

classe di resistenza

C 30/37

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$$

$$f_{cd} \geq 17 \text{ N/mm}^2$$

modulo elastico

$$E = 28500 \text{ MPa}$$

dosaggio fibre

$$\geq 3 \text{ kg/m}^3$$

Acciaio per centine galleria

tipo di acciaio

S275

tensione di snervamento

$$f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$$

tensione di calcolo

$$f_{yd} = 261.9 \text{ N/mm}^2$$

tensione di rottura
 modulo elastico

$f_{tk} = 430 \text{ N/mm}^2$
 $E = 210 \text{ GPa}$

Calcestruzzo per getti in opera in sotterraneo

classe di resistenza
 $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$
 modulo elastico

C 30/37
 $f_{cd} \geq 17.00 \text{ N/mm}^2$
 $E = 32800 \text{ MPa}$

Acciaio in barre per armature

tipo di acciaio
 modulo elastico

B450C
 $E = 210 \text{ GPa}$

Elementi strutturali in VTR al fronte

densità
 resistenza a trazione
 allungamento a rottura
 resistenza a flessione
 resistenza a taglio
 modulo elastico
 contenuto in vetro in peso

$\geq 1.7 \text{ t/ m}^3$
 $\geq 400 \text{ MPa (UNI 5819)}$
 $\geq 2\%$
 $\geq 350 \text{ MPa (UNI 4219)}$
 $\geq 85 \text{ MPa (ASTM D732)}$
 $E \geq 15000 \text{ MPa}$
 $\geq 55\%$

Infilaggi in tubi in acciaio

tipo di acciaio
 secondo UNI EN 10210 - 1 o UNI EN 10219

S355JRH o S355J0H

6. GALLERIE DI ACCESSO: ANALISI NUMERICHE AGLI ELEMENTI FINITI

Nel presente capitolo vengono dapprima descritte le strategie di analisi impiegate per le simulazioni numeriche agli elementi finiti e le caratteristiche dei modelli realizzati, successivamente vengono illustrati i principali risultati ottenuti dalle simulazioni condotte.

6.1 Generalità

Per la valutazione del comportamento tensio-deformativo dell'ammasso roccioso e delle strutture di sostegno delle opere in sotterraneo sono state condotte delle analisi numeriche di simulazione dello scavo con il metodo degli elementi finiti, in condizioni di deformazione piana, utilizzando il codice di calcolo Phase 2 v. 8.024.

Il metodo degli elementi finiti in campo piano permette una valutazione, in termini quantitativi, dello stato tensionale e degli spostamenti nel terreno e nelle strutture, tenendo conto di uno stato di tensione iniziale anisotropo, dell'effettiva situazione geometrica in esame e della sequenza degli interventi previsti.

Lo stato tensionale iniziale è stato supposto di tipo geostatico; le tensioni principali massime e minime sono state assegnate mediante una prima fase di inizializzazione (Step 0), in cui agli elementi del modello, a partire da uno stato tensionale nullo, vengono applicate le forze di volume costituite dal peso proprio attribuito ai diversi materiali.

La simulazione delle diverse fasi di scavo e costruzione è stata condotta "attivando", nel corso della sequenza delle analisi, le caratteristiche degli elementi che nel modello rappresentano le strutture di sostegno e di rivestimento. Al tempo stesso, in accordo alle modalità esecutive seguite, lo scavo è stato riprodotto mediante l'usuale procedimento che consiste nel "disattivare elementi scavati" ed applicare sul contorno dello scavo delle forze nodali che portino su di esso, in modo graduale, a componenti di sollecitazione (normale e di taglio) nulle.

Per simulare gli effetti tensionali indotti dagli scavi, considerando la tridimensionalità del problema, si è adottata una tecnica di simulazione comunemente utilizzata nel calcolo di gallerie: questa consiste nell'applicazione di un sistema di forze equivalenti, con le quali la superficie lungo cui si opera lo scavo viene liberata dalle tensioni inizialmente presenti nel terreno (Barla e Jarre, 1986).

L'effetto di contenimento del cavo, dovuto al fronte di avanzamento, è introdotto nelle analisi graduando il sistema di forze equivalenti applicate sulla superficie dello scavo, in

accordo con i procedimenti costruttivi previsti. La percentuale delle forze di scavo da applicare è valutabile, in funzione della distanza del fronte di avanzamento dalla sezione di calcolo, del comportamento del terreno (elastico; elasto-plastico) e della eventuale presenza di interventi di contenimento sul nucleo di scavo.

In relazione a quanto sopra, il metodo comporta:

- definizione del modello (dimensione fisica e geometrica della regione da rappresentare, sia per il terreno che per le strutture di sostegno, numerazione dei nodi e degli elementi, condizioni di contorno)
- definizione delle leggi sforzo-deformazione e di resistenza dei materiali interessati
- definizione dello stato tensionale preesistente nel terreno, prima dello scavo della galleria
- simulazione delle fasi esecutive previste.

I modelli numerici sono stati sufficientemente estesi in profondità e lateralmente per permettere di ritenere trascurabili le condizioni di vincolo introdotte sui bordi dei modelli stessi. Nei casi di elevata copertura il modello non viene esteso fino al piano campagna, ma si tiene conto del reale carico geostatico definendo nel software la copertura voluta.

Le strutture costituenti il rivestimento di prima fase, in calcestruzzo proiettato armato con centine, e le strutture costituenti il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato sono state discretizzate con elementi monodimensionali di tipo "liner" con comportamento elastico e caratteristiche meccaniche ed inerziali equivalenti a quelle delle strutture simulate.

Le diverse fasi considerate nelle analisi sono riepilogate di seguito per le diverse sezioni tipo. I valori del rilascio tensionale parziale impiegati durante le diverse fasi realizzative sono stati definiti, per ciascuna sezione di calcolo secondo la formula sottostante in base alla distanza di installazione dei rivestimenti.

$$\lambda(x) = 0,28 + 0,72 \left\{ 1 - \left[\frac{0,84 \cdot a}{(0,84 \cdot a + x)} \right]^2 \right\}$$

dove:

- λ è lo scarico parziale delle tensioni
- x è la distanza dal fronte
- a è il raggio equivalente della sezione di scavo

Sezione tipo SGPz1

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale fino al 80% delle forze agenti

- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con parametri di resistenza dello spritz ridotti (spritz fresco) con ulteriore rilascio tensionale parziale fino al 88% delle forze agenti
- STEP5 - Maturazione dello spritz con ulteriore rilascio tensionale parziale fino all'94%
- STEP6 - Posa del rivestimento definitivo e allontanamento del fronte di scavo con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP8 - Fase di esercizio a lungo termine, si è valutato il deterioramento completo del rivestimento di prima fase con il rilascio delle tensioni sul rivestimento definitivo

Sezioni tipo SGPz1*, SGC2, SGC3

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale fino al 80% delle forze agenti
- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con parametri di resistenza dello spritz ridotti (spritz fresco) con ulteriore rilascio tensionale parziale fino al 85% delle forze agenti
- STEP5 - Maturazione dello spritz con ulteriore rilascio tensionale parziale fino all'90%
- STEP6 - Posa del rivestimento definitivo e allontanamento del fronte di scavo con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP8 - Fase di esercizio a lungo termine, si è valutato il deterioramento completo del rivestimento di prima fase con il rilascio delle tensioni sul rivestimento definitivo

Sezione tipo SGC1

- STEP1 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione elastica)
- STEP2 - Imposizione dello stato tensionale iniziale al modello (inizializzazione plastica)
- STEP3 - Scavo a piena sezione della galleria con rilascio tensionale parziale fino al 80% delle forze agenti
- STEP4 - Posa del rivestimento di prima fase con parametri di resistenza dello spritz ridotti (spritz fresco) con ulteriore rilascio tensionale parziale fino al 83% delle forze agenti
- STEP5 - Maturazione dello spritz con ulteriore rilascio tensionale parziale fino all'85%
- STEP6 - Posa del rivestimento definitivo e allontanamento del fronte di scavo con rilascio tensionale completo delle forze agenti
- STEP8 - Fase di esercizio a lungo termine, si è valutato il deterioramento completo del rivestimento di prima fase con il rilascio delle tensioni sul rivestimento definitivo

6.2 Sezione tipo SGPz1

La sezione tipo SGPz1 è stata verificata per coperture medio alte, pari a 155 m, all'interno della formazione di Terravecchia (TRVa).

I parametri utilizzati per la modellazione sono riepilogati nella seguente Tabella 6.2:

Tabella 6.1 - Caratteristiche geomeccaniche della formazione di Terravecchia (150 m profondità)

γ	c'	ϕ'	ν	E
kN/m ³	kPa	°	.	MPa
20	60	24	0.3	400

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalla formazione di Terravecchia (Figura 6.1).

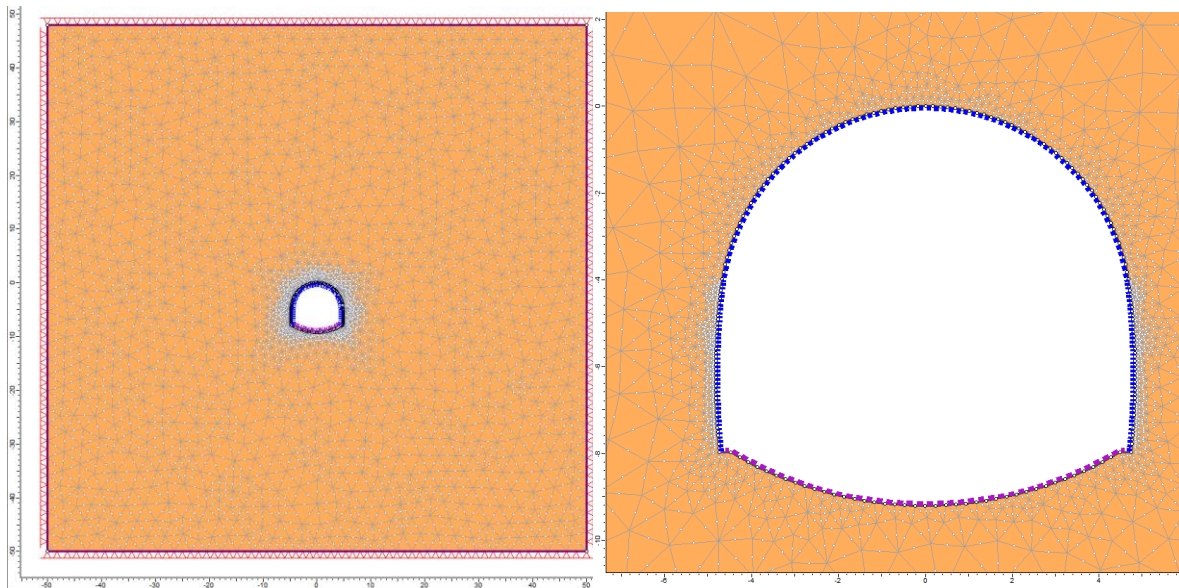


Figura 6.1 - Sezione tipo SGPz1: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nella figura seguente in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento dell'ammasso nell'intorno della galleria, relativi allo step di esercizio (Figura 6.2).

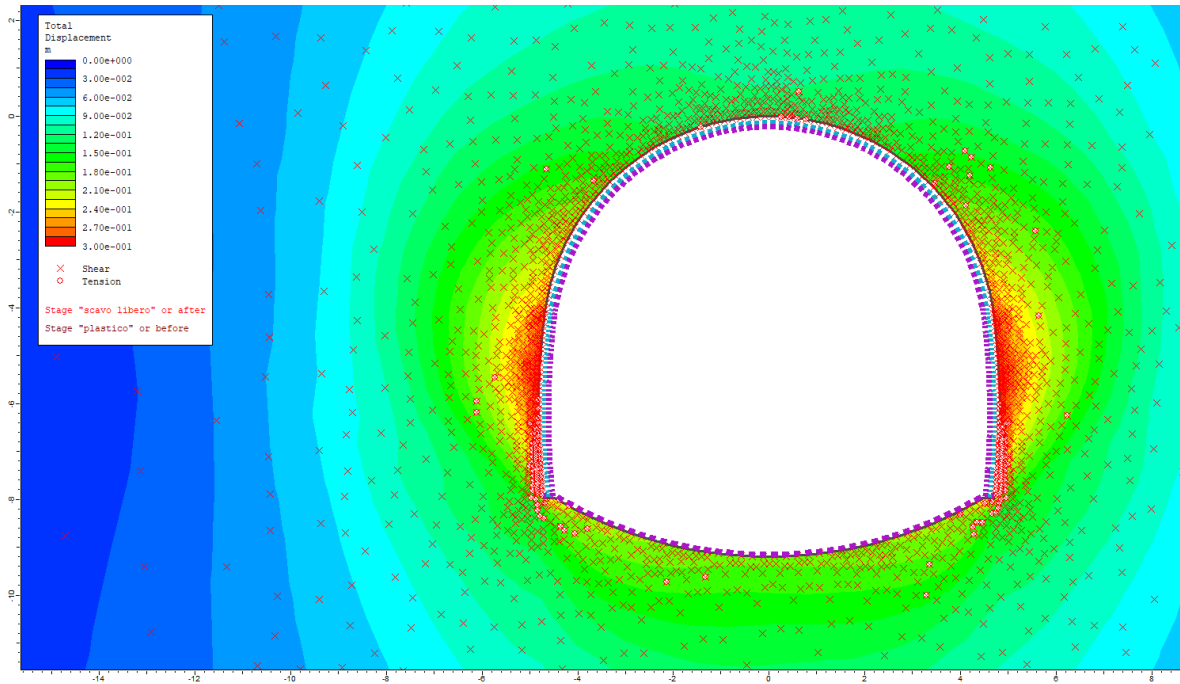


Figura 6.2 - Sezione tipo SGPz1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

I modelli numerici evidenziano che:

- si ha una porzione di ammasso plasticizzata piuttosto importante in tutto l'intorno, circa 13 m di spessore
- gli spostamenti massimi cumulati durante la fase di esercizio risultano importanti con un massimo di 28 cm sui piedritti
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste.

6.3 Sezione tipo SGPz1*

La sezione tipo SGPz1* è stata verificata per la condizione di copertura massima all'interno delle marne di Enna (ENNa), pari a circa 215 m (Tabella 6.3).

Tabella 6.2 - Caratteristiche geomeccaniche marne di Enna (200 m profondità)

γ	σ_{ci}	GSI	m_i	D	m_b	s	a	v	MR	E_d
kN/m ³	MPa	.	.	.	.	.	.	.	.	MPa
24	20	55	4	0	0.802	0.0067	0.504	0.3	250	2041.4

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalle marne di Enna (Figura 6.3)

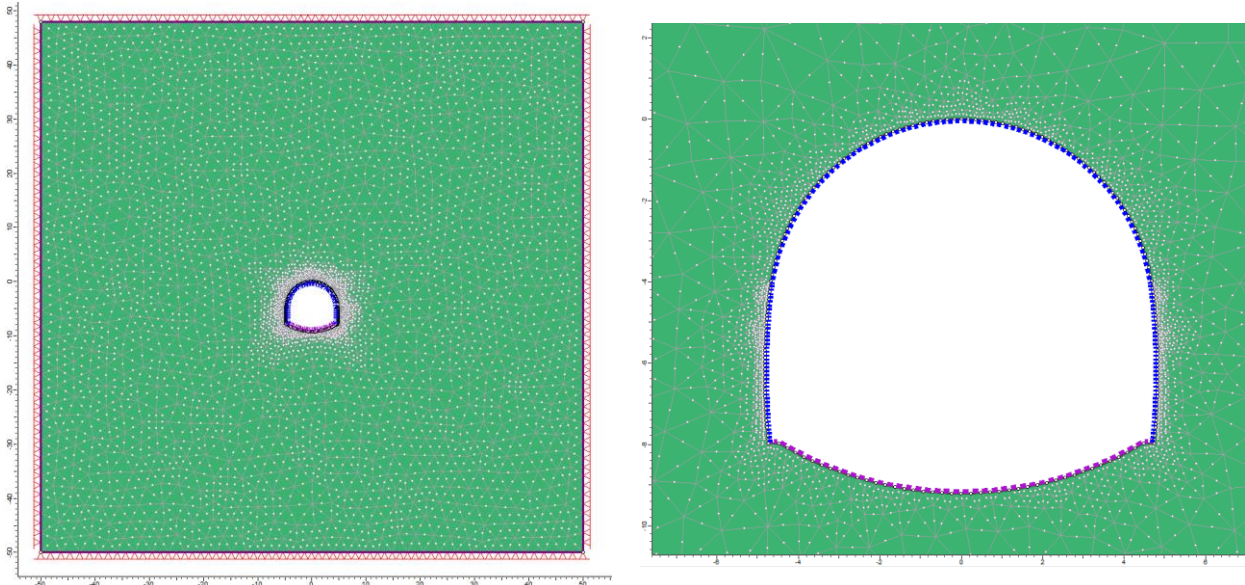


Figura 6.3 - Sezione tipo SGPz1*: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nella figura seguente in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento dell'ammasso nell'intorno della galleria, relativi allo step di esercizio (Figura 6.4).

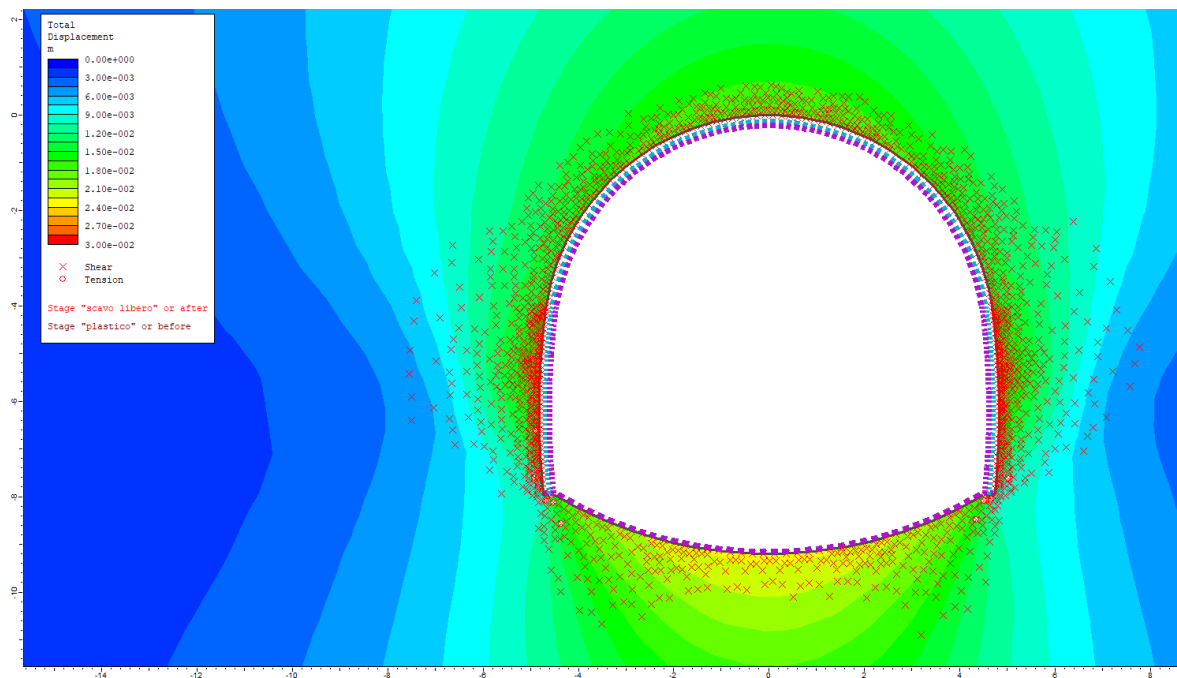


Figura 6.4 - Sezione tipo SGPz1*: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

I modelli numerici evidenziano che:

- si ha una fascia di ammasso plasticizzata, con spessore variabile tra i 65 cm in calotta e i 300 cm in corrispondenza dei piedritti

- gli spostamenti massimi cumulati durante la fase di esercizio risultano di ordine centimetrico, con un massimo di circa 2.3 cm in arco rovescio ed un minimo di 1.7 sui piedritti
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste.

6.4 Sezione tipo SGC1

La sezione tipo SGC1 è stata verificata per la condizione di copertura media all'interno della formazione di Terravecchia (TRVa), pari a circa 65 (Tabella 6.4).

Tabella 6.3 - Caratteristiche geomeccaniche formazione di Terravecchia (60 m profondità)

γ	c'	ϕ'	ν	E
kN/m ³	kPa	°	.	MPa
20	26	17	0.3	300

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalla formazione di Terravecchia (Figura 6.5).

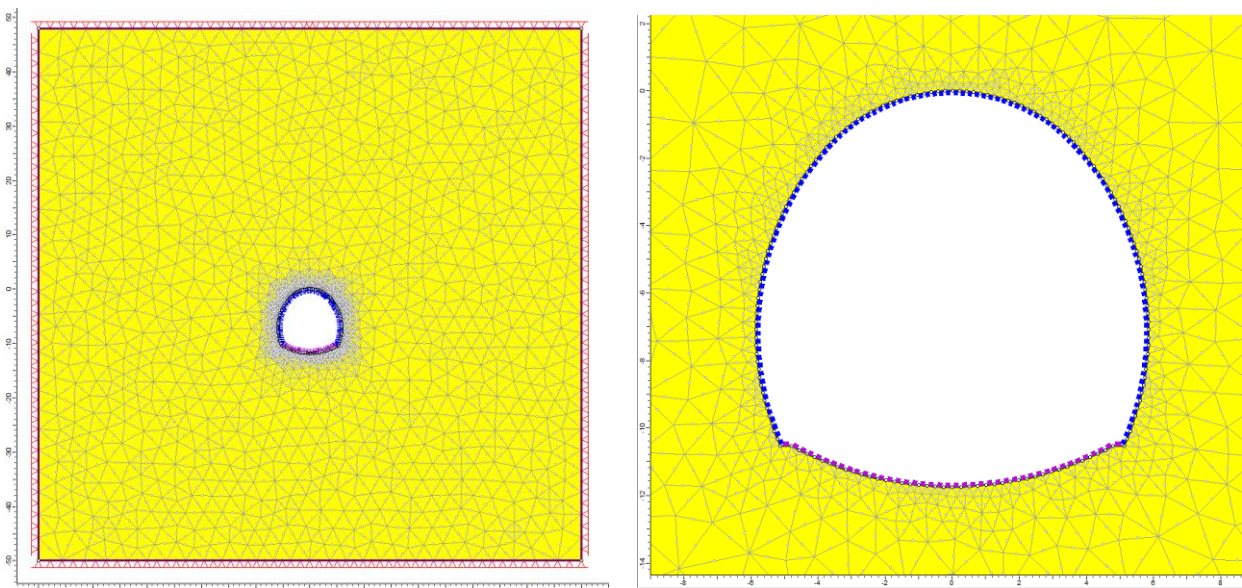


Figura 6.5 - Sezione tipo SGC1: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nella figura seguente in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento dell'ammasso nell'intorno della galleria, relativi allo step di esercizio (Figura 6.6).

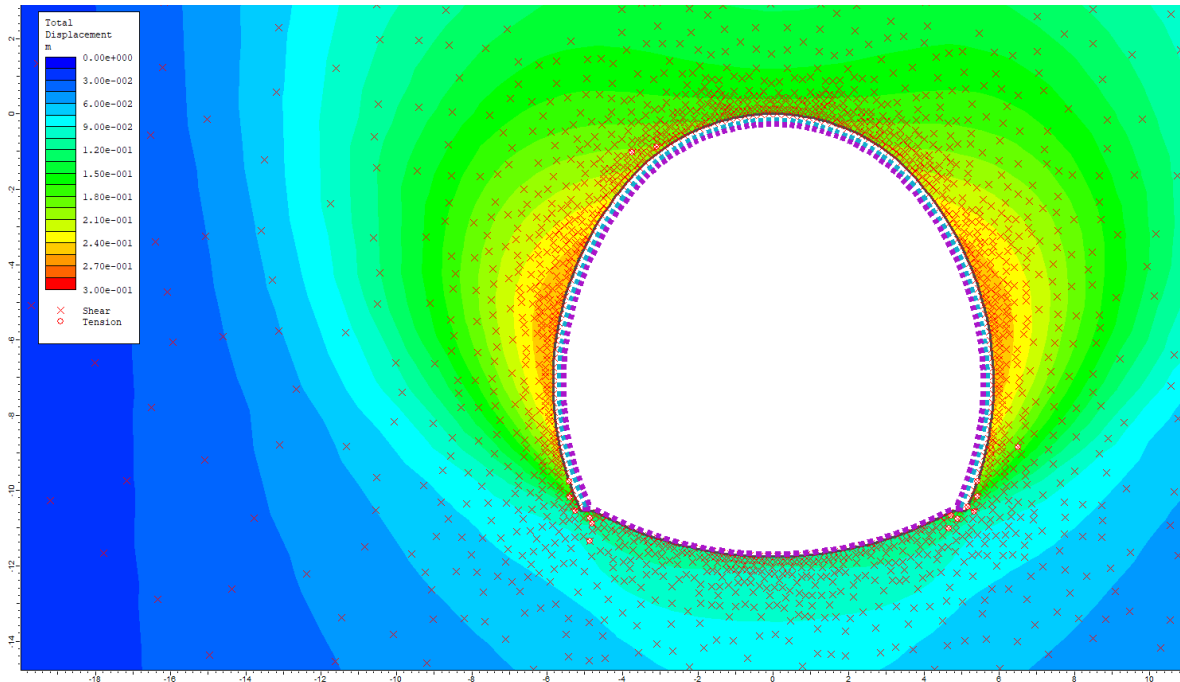


Figura 6.6 - Sezione tipo SGC1: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

I modelli numerici evidenziano che:

- si ha una fascia di ammasso plasticizzata piuttosto importante, con uno spessore di 18 m e con la tendenza a crescere verso la superficie in calotta
- gli spostamenti massimi cumulati durante la fase di esercizio risultano importanti con un massimo di 25.5 cm ai piedritti
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste.

6.5 Sezione tipo SGC2

La sezione tipo SGC2 è stata verificata per la massima copertura nella formazione di Terravecchia (TRVa), pari a 280 m (Tabella 6.5).

Tabella 6.4 - Caratteristiche geomeccaniche formazione di Terravecchia (300 m profondità)

γ	c'	ϕ'	ν	E
kN/m ³	kPa	°	.	MPa
20	80	26	0.3	700

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dalla formazione di Terravecchia (Figura 6.7).

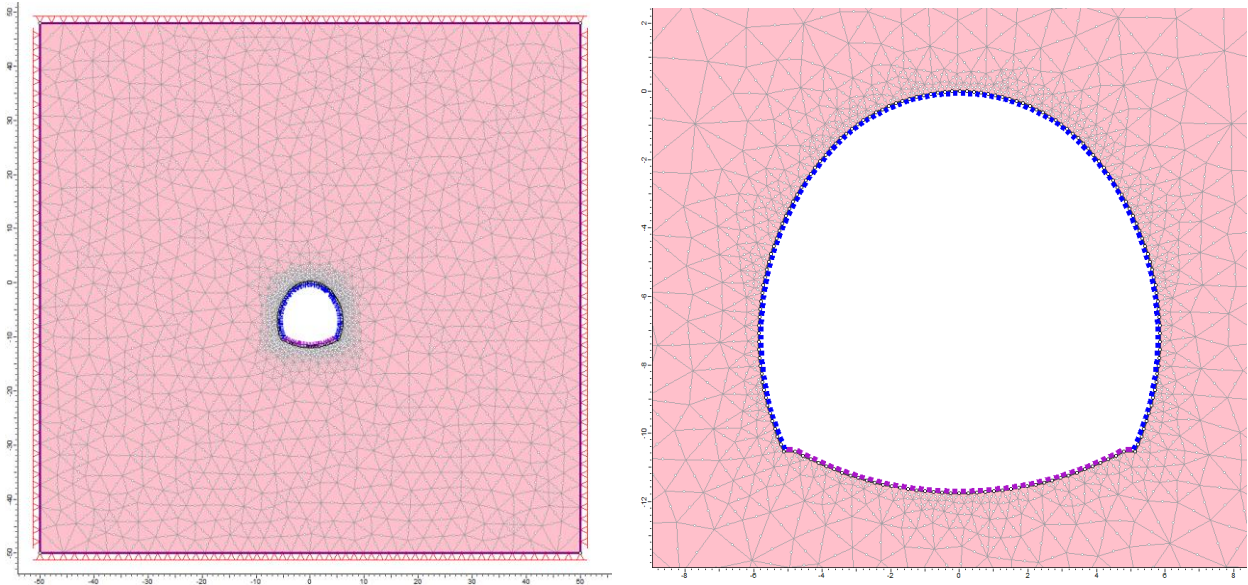


Figura 6.7 - Sezione tipo SGC2: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nella figura seguente in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento dell'ammasso nell'intorno della galleria, relativi allo step di esercizio (Figura 6.8).

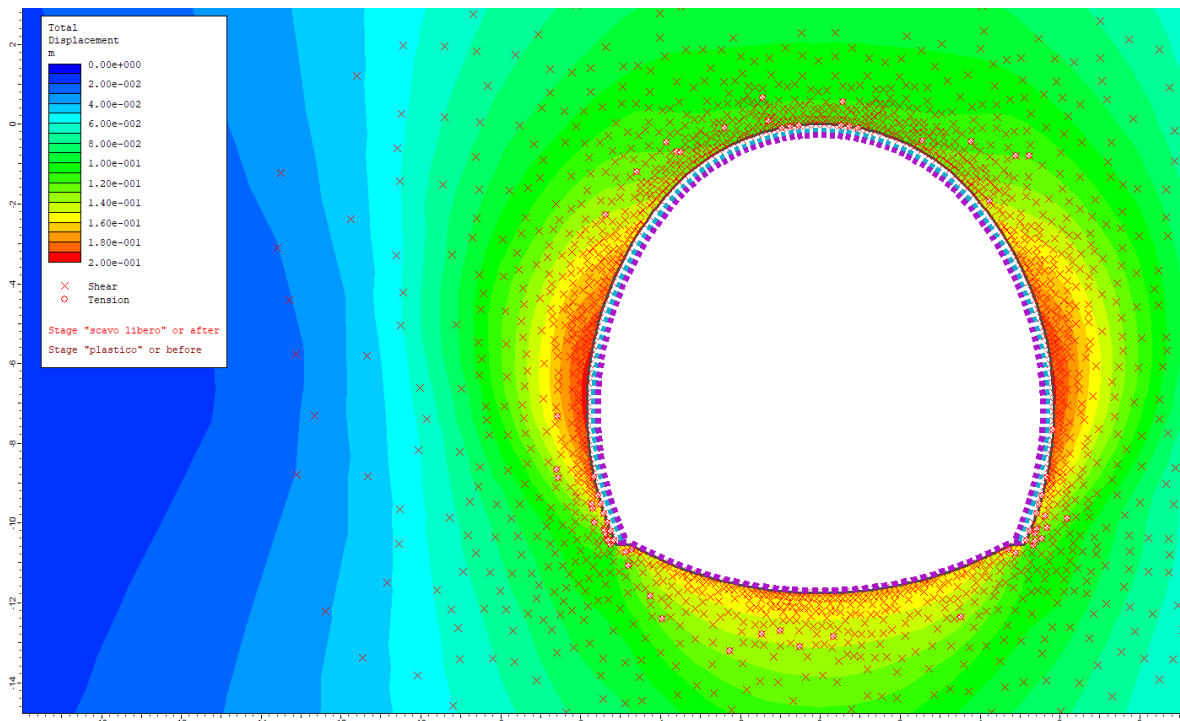


Figura 6.8 - Sezione tipo SGC2: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

I modelli numerici evidenziano che:

- si ha una fascia di ammasso plasticizzata, con spessore variabile tra i 2.5 m in calotta e i 9 m in corrispondenza dei piedritti
- gli spostamenti massimi cumulati durante la fase di esercizio risultano importanti con un massimo di 19 cm ai piedritti
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste.

6.6 Sezione tipo SGC3

La sezione tipo SGC3 è stata verificata per la massima copertura all'interno dei Gesib(GTL2), pari a 280 m (Tabella 6.6).

Tabella 6.5 - Caratteristiche geomeccaniche Gessi (GTL2)

γ	σ_{ci}	GSI	m_i	D	m_b	s	a	v	E_i	E_d
kN/m ³	MPa	.	.	.	.	.	.	.	MPa	MPa
22	20	50	8	0	1.341	0.0039	0.506	0.3	19000	5836.53

In considerazione dell'elevata copertura il modello non è stato esteso fino al piano campagna, pertanto la stratigrafia di analisi vede la presenza di un unico litotipo costituito dai Gessi (Figura 6.9).

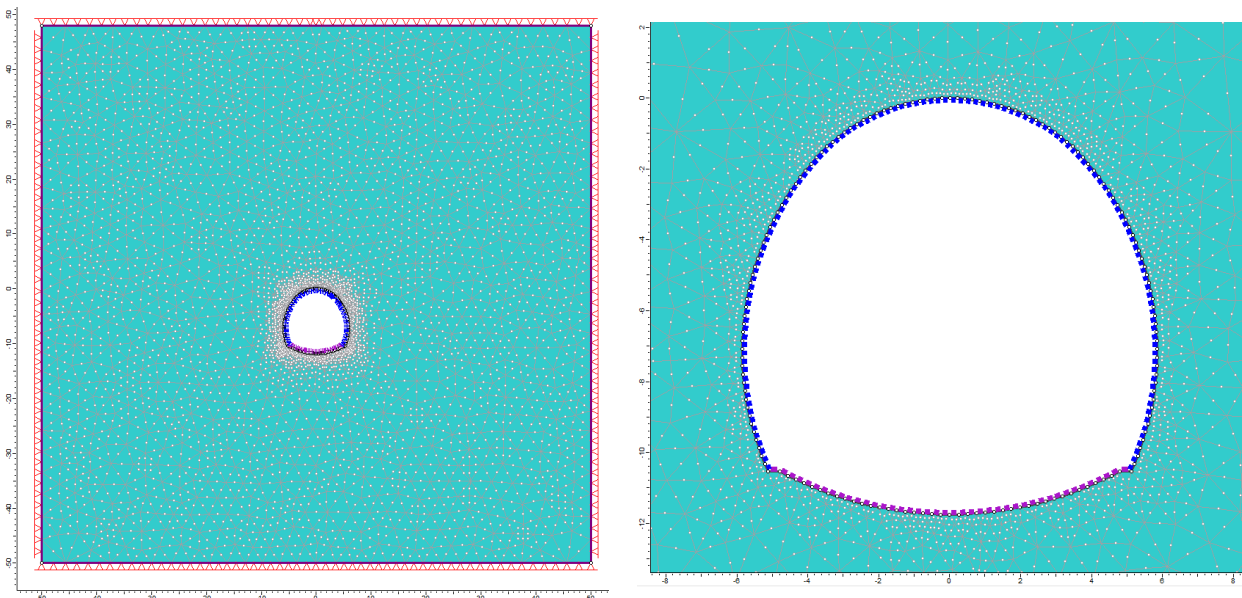


Figura 6.9 - Sezione tipo SGC3: Geometria del modello numerico per le analisi e particolare dell'intorno del cavo

I risultati delle analisi sono illustrati nella figura seguente in cui sono riportati il diagramma con l'estensione della fascia plastica ed il campo di spostamento dell'ammasso nell'intorno della galleria, relativi allo step di esercizio (Figura 6.10).

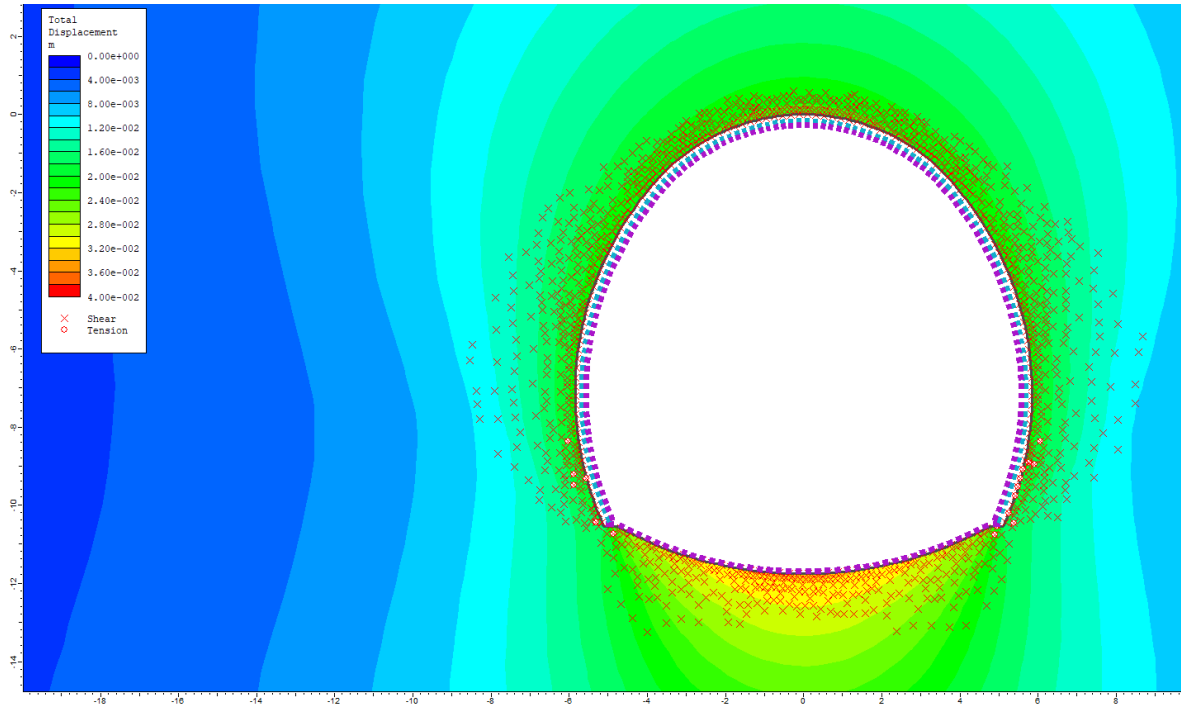


Figura 6.10 - Sezione tipo SGC3: raggio plastico e spostamenti nella fase di esercizio

I modelli numerici evidenziano che:

- si ha una fascia di ammasso plasticizzata, con spessore variabile tra i 80 cm in calotta e i 300 cm in corrispondenza dei piedritti
- gli spostamenti massimi cumulati durante la fase di esercizio risultano di ordine centimetrico con un massimo di circa 3 cm in arco rovescio ed un minimo di 2 cm in corrispondenza dei piedritti
- le sollecitazioni agenti sul rivestimento mostrano valori inferiori ai limiti di resistenza delle strutture previste.

7. GALLERIE DI ACCESSO: VERIFICHE STRUTTURALI DEI SOSTEGNI

Per il predimensionamento delle strutture di rivestimento delle gallerie si è effettuato il calcolo delle sollecitazioni nelle strutture tramite una serie di analisi numeriche di interazione tra le strutture di rivestimento stesse e l'ammasso roccioso circostante che hanno consentito di valutare lo stato tensio-deformativo nelle strutture e nell'ammasso stesso. I risultati ottenuti dalle suddette analisi sono descritti e commentati nel Capitolo precedente della presente relazione.

Le verifiche di predimensionamento delle strutture previste dal progetto sono state condotte relativamente sia alle strutture costituenti il rivestimento di prima fase sia alle strutture costituenti il rivestimento definitivo.

7.1 Approcci di calcolo

7.1.1 Verifiche dei rivestimenti delle gallerie

Con riferimento ai valori delle caratteristiche di sollecitazione derivati dall'analisi numerica, sono state condotte le verifiche del rivestimento in ottemperanza alle norme vigenti per i materiali impiegati. Le verifiche della sicurezza e delle prestazioni sono state condotte adottando il metodo semi-probabilistico agli Stati Limite Ultimi proposto dalle NTC 2018.

Per ciascuna fase dell'analisi sono state individuate le sezioni di massima sollecitazione, in relazione ai valori massimi calcolati di sforzo normale, momento flettente e sforzo di taglio e ne è stato verificato il dimensionamento e la compatibilità con la resistenza dei materiali adottati.

Le caratteristiche dei materiali adottati per le strutture di rivestimento sono richiamate al Paragrafo 5.4 della presente relazione.

Le verifiche sono state effettuate in riferimento alla seguente combinazione di coefficienti:

approccio 1 - combinazione 1: A1+M1+R1

in quanto è la combinazione più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno. I coefficienti parziali per le azioni γ_F utilizzati nelle analisi sono quelli indicati nella Tabella 6.2.I delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 7.1).

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno γ_M utilizzati nelle analisi sono quelli indicati nella Tabella 6.2.II delle NTC 2018, qui riportata (Tabella 7.2).

Tabella 7.1 - Coefficienti parziali delle azioni (Tabella 6.2.I NTC2018)

Carichi	Effetto	Coefficiente	EQU	A1 STR	A2 GEO
Permanenti G ₁	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali G ₂ (1)	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

Per i carichi permanenti G₂ si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tabella 7.2 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici (Tabella 6.2.II NTC2018)

Parametro geotecnico		Coefficiente parziale γ_M	
		M1	M2
$\tan\phi'_k$	Tangente dell'angolo di attrito	1,00	1,25
c'_k	Coesione efficace	1,00	1,25
$c_{u,k}$	Resistenza al taglio non drenata	1,00	1,40
γ	Peso di volume	1,00	1,00

Le verifiche di resistenza dei rivestimenti sono state condotte nei confronti della pressoflessione e del taglio considerando, per ciascuna fase di analisi, le caratteristiche di sollecitazione derivanti dalle simulazioni numeriche.

La verifica a pressoflessione dei rivestimenti di prima fase costituiti da calcestruzzo proiettato e centine metalliche viene effettuata considerando il diagramma di resistenza¹ della sezione composta acciaio-calcestruzzo. Nella verifica viene cautelativamente trascurato il contributo delle fibre presenti nel calcestruzzo proiettato.

La verifica allo Stato Limite Ultimo per taglio dei rivestimenti di prima fase costituiti da calcestruzzo proiettato e centine metalliche viene effettuata considerando solamente la resistenza delle centine e trascurando cautelativamente il contributo del calcestruzzo proiettato. La verifica a taglio viene considerata soddisfatta quando:

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

con

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$$

Nei seguenti paragrafi sono illustrati i risultati di calcolo relativi alle verifiche condotte.

¹ Il diagramma di resistenza della sezione composta acciaio-calcestruzzo è stato ottenuto mediante l'ausilio del software MidasGen 2020.

7.2 Sezione tipo SGPz1

7.2.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo SGPz1 presenta un rivestimento di prima fase costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.1), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

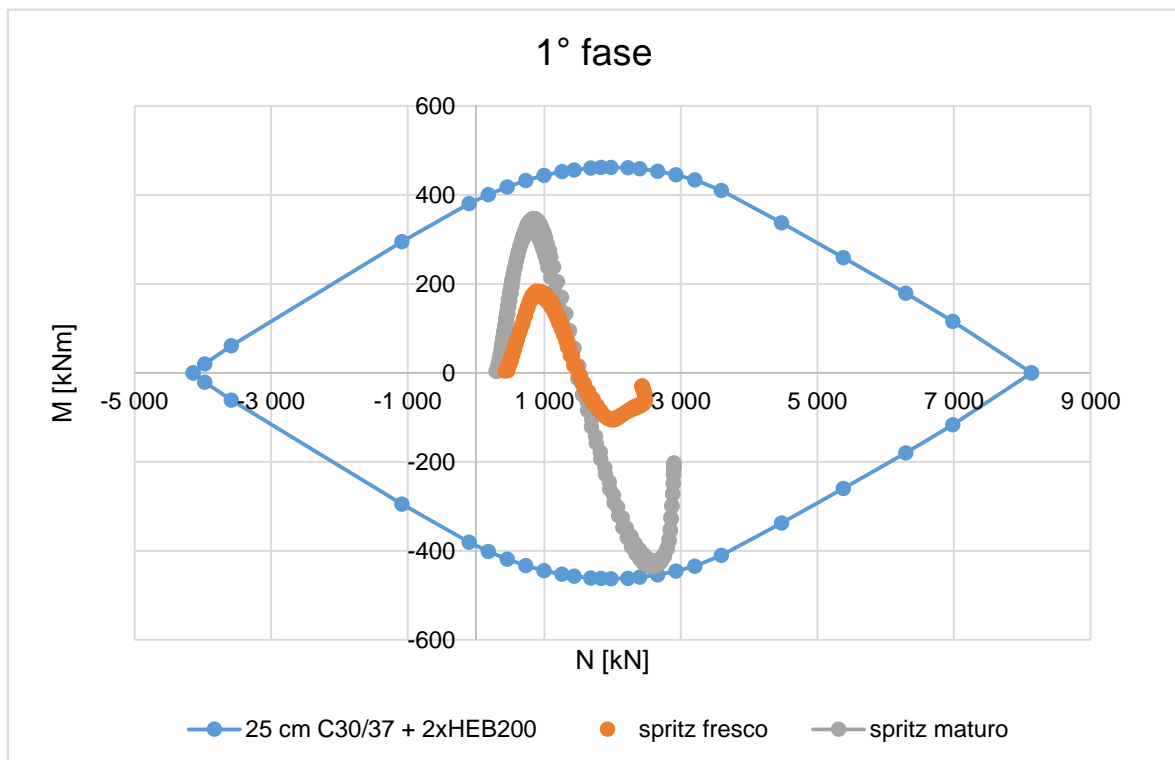


Figura 7.1 - Sezione tipo SGPz1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Per la verifica a taglio della sezione non si è tenuto conto dell'apporto di resistenza fornito delle fibre. Il rivestimento presenta resistenza a taglio pari a 723.7 kN/m, mentre la sollecitazione massima vale 239.4 kN/m la verifica risulta quindi soddisfatta.

7.2.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo SGPz1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 \varnothing 26 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.2), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

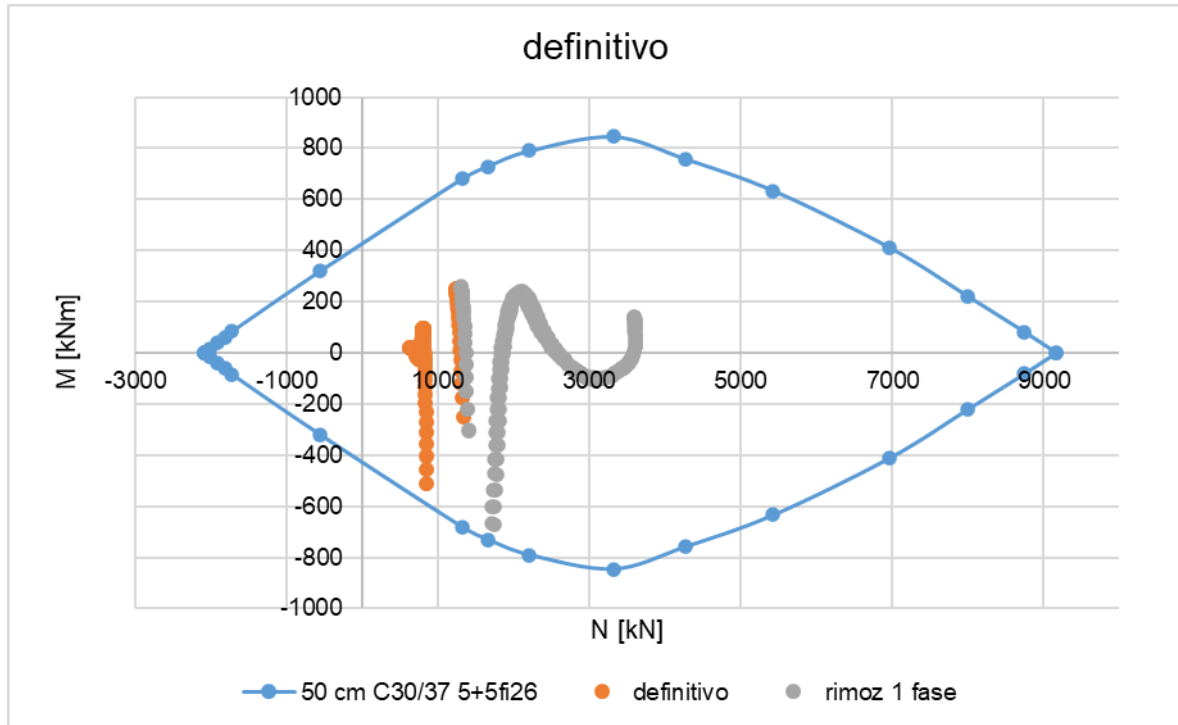


Figura 7.2 - Sezione tipo SGPz1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio, pari a 746 kN, la si registra durante l'ultima fase, quando si simula il decadimento del rivestimento di prima fase ed il rilascio sul rivestimento definitivo dei carichi da esso prima sostenuti, i valori maggiori li si ottiene negli spigoli tra piedritti ed arco rovescio dove si ha un punto singolare per cui la modellazione aumenta sensibilmente il valore reale. Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\varnothing 12$ con maglia 20 x 40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m, nell'intorno della giunzione tra piedritti ed arco rovescio è comunque consigliato infittire le staffe con passo 20 x 20 per un tratto di 1 m dall'intersezione, ottenendo così un taglio resistente di 1120 kN/m.

Così armata la sezione tipo SGPz1 risulta verificata per le azioni ottenute dalla modellazione.

7.3 Sezione tipo SGPz1*

7.3.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo SGPz1* presenta un rivestimento di prima fase costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.3), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

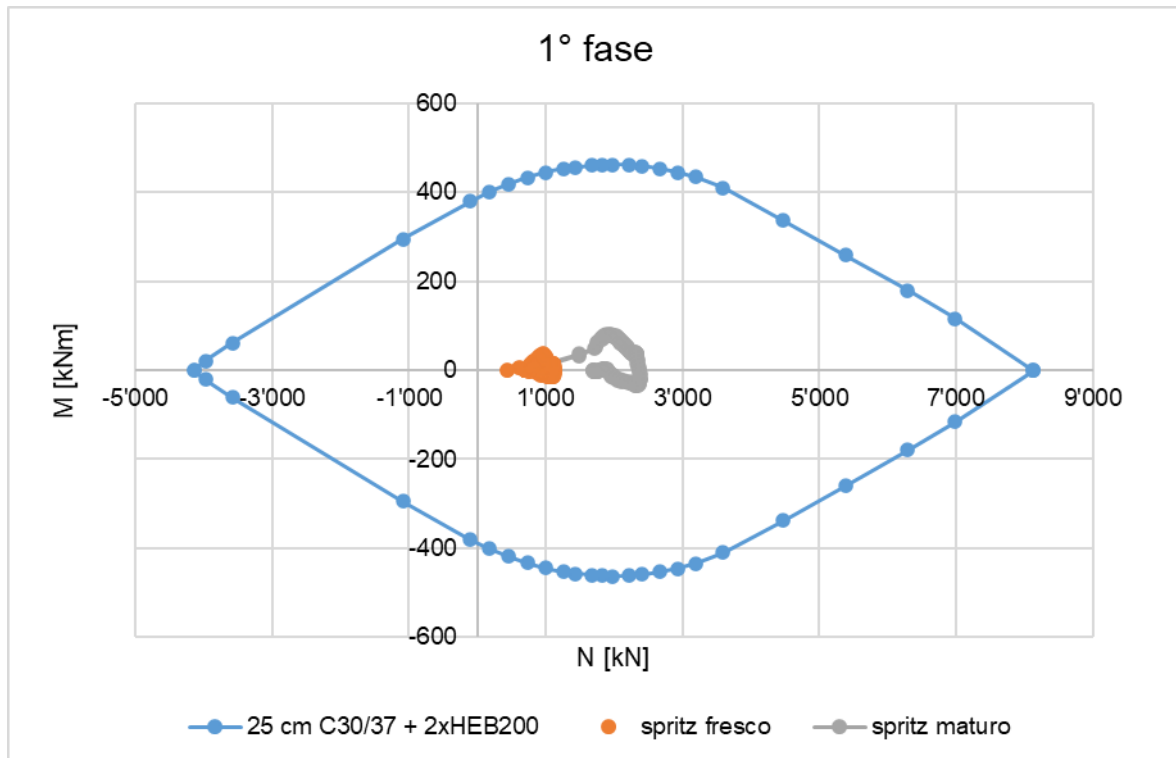


Figura 7.3 - Sezione tipo SGPz1*: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Per la verifica a taglio della sezione non si è tenuto conto dell'apporto di resistenza fornito delle fibre. Il rivestimento presenta resistenza a taglio pari a 723.7 kN/m, mentre la sollecitazione massima vale 273.5 kN/m la verifica risulta quindi soddisfatta.

7.3.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo SGPz1* presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 \varnothing 24 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.4), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

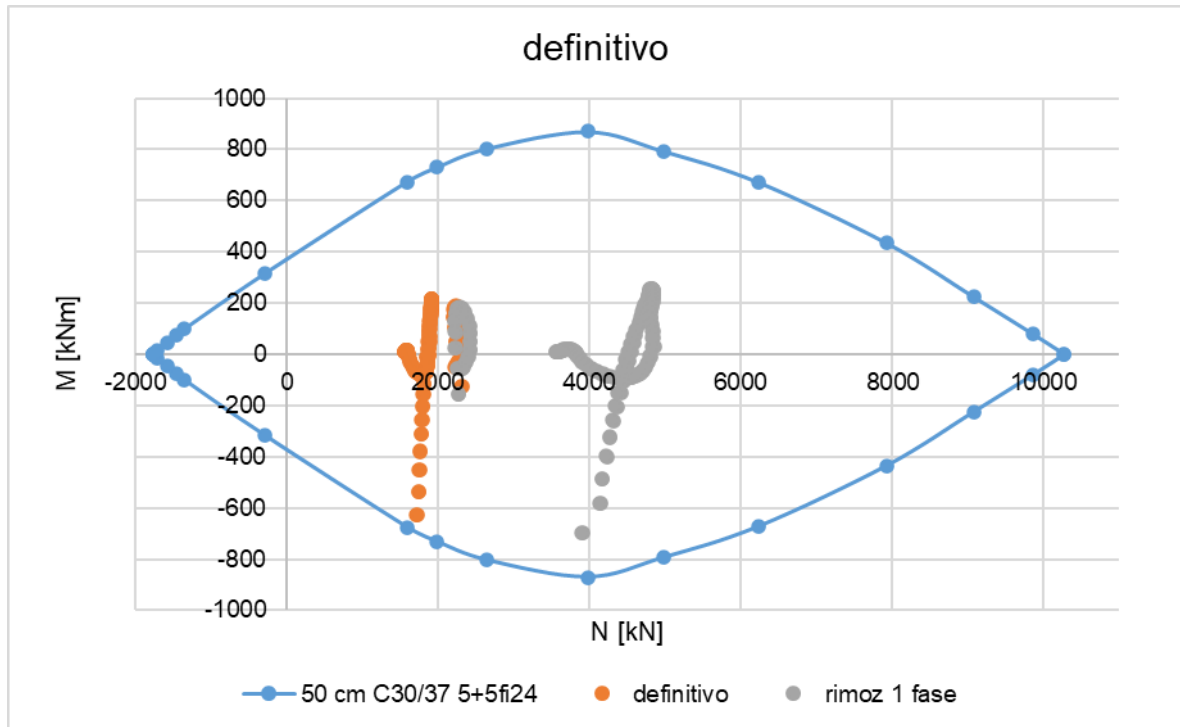


Figura 7.4 - Sezione tipo SGPz1*: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio la si registra durante l'ultima fase, quando si simula il decadimento del rivestimento di prima fase ed il rilascio sul rivestimento definitivo dei carichi da esso prima sostenuti, i valori maggiori li si ottiene negli spigoli tra piedritti ed arco rovescio dove si ha un punto singolare per cui la modellazione aumenta sensibilmente il valore reale (Figura 7.8). Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\varnothing 12$ con maglia 20×40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m, nell'intorno della giunzione tra piedritti ed arco rovescio è comunque consigliato infittire le staffe con passo 20×20 per un tratto di 1 m dall'intersezione, ottenendo così un taglio resistente di 1120 kN/m.

Come si vede in Figura 7.5 l'andamento delle tensioni di taglio subisce un repentino abbassamento allontanandosi dallo spigolo dimezzandosi ad una distanza di circa 25 cm dallo spigolo (freccia rossa). È quindi possibile non tenere in conto questi valori per le verifiche.

Così armata la sezione tipo SGPz1* risulta verificata per le azioni ottenute dalla modellazione.

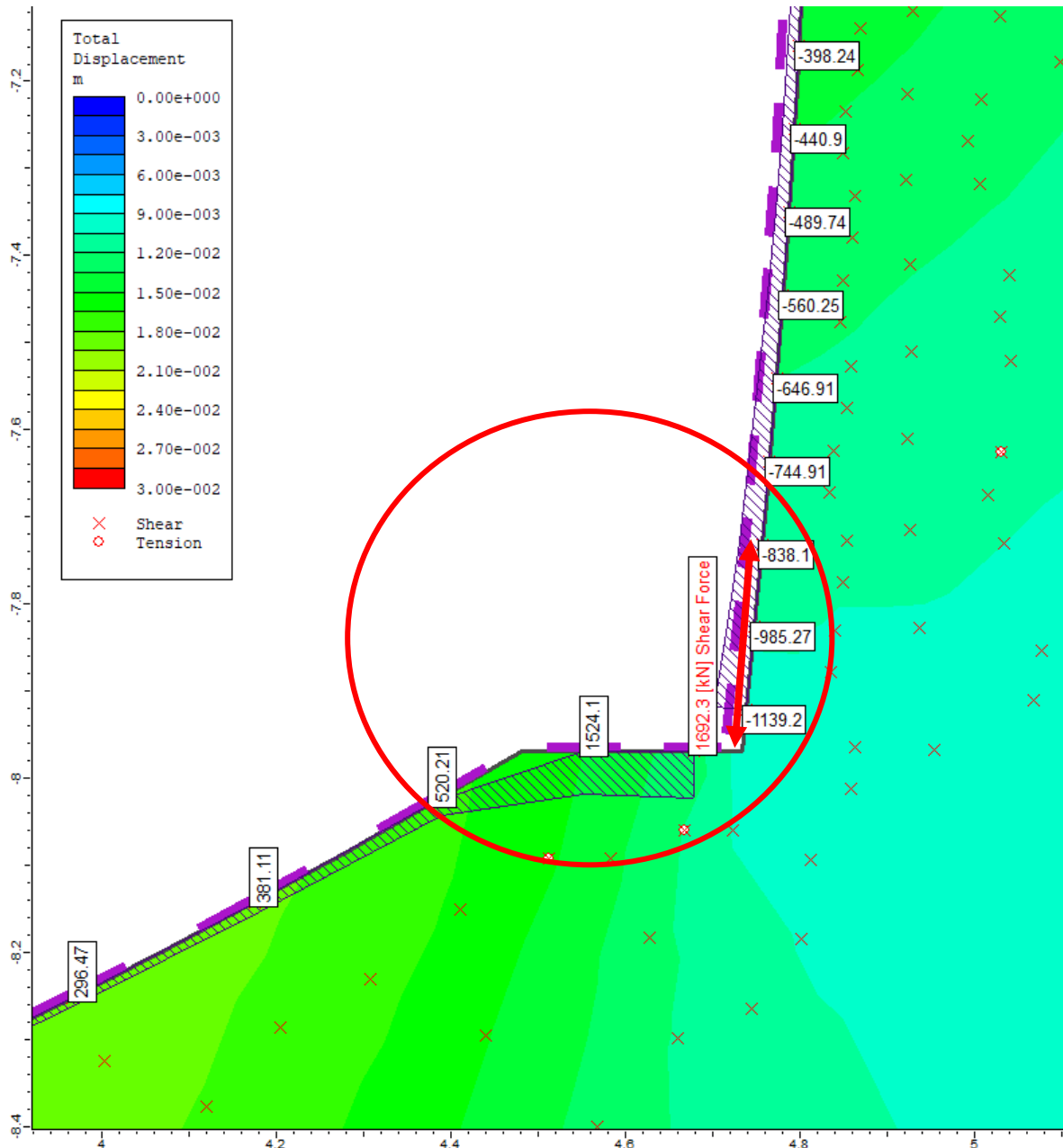


Figura 7.5 - Sezione SGPz1*: Andamento delle tensioni di di taglio

7.4 Sezione tipo SGC1

7.4.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo SGC1 presenta un rivestimento di prima fase costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.6), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

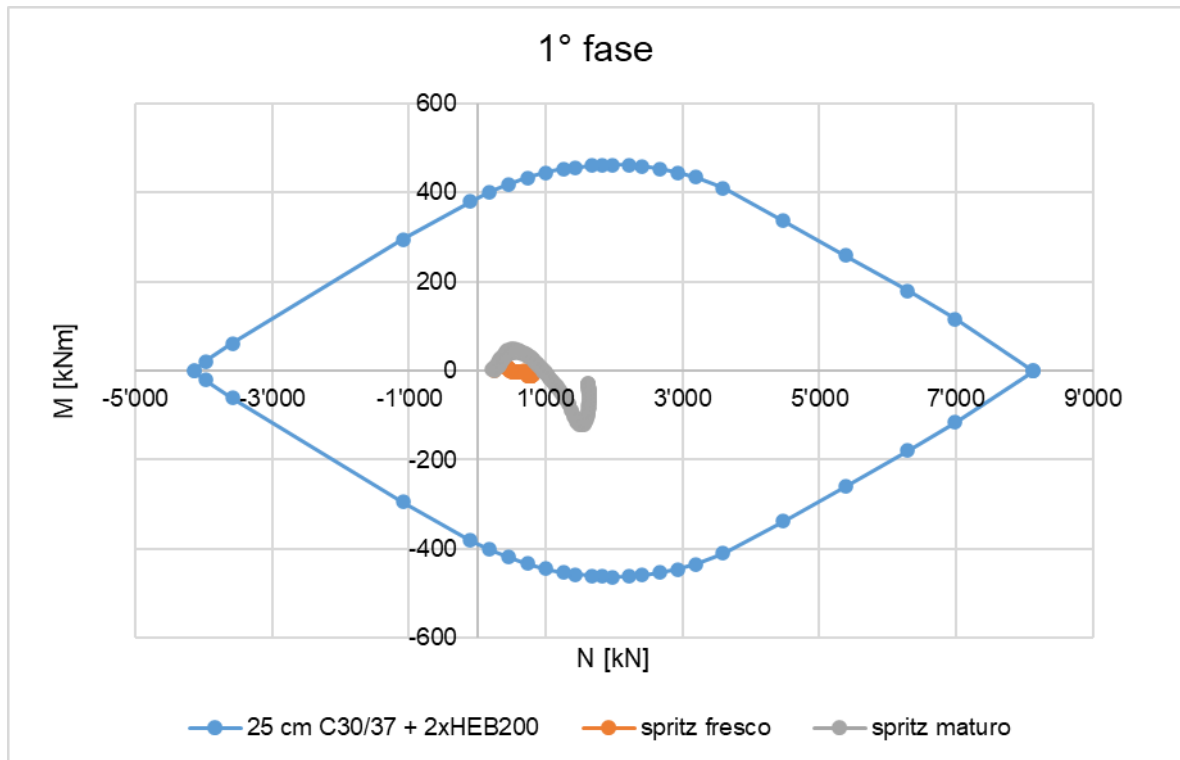


Figura 7.6 - Sezione tipo SGC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Per la verifica a taglio della sezione non si è tenuto conto dell'apporto di resistenza fornito delle fibre. Il rivestimento presenta resistenza a taglio pari a 723.7 kN/m, mentre la sollecitazione massima vale 91.9 kN/m la verifica risulta quindi soddisfatta.

7.4.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo SGC1 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 \varnothing 24 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.7), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

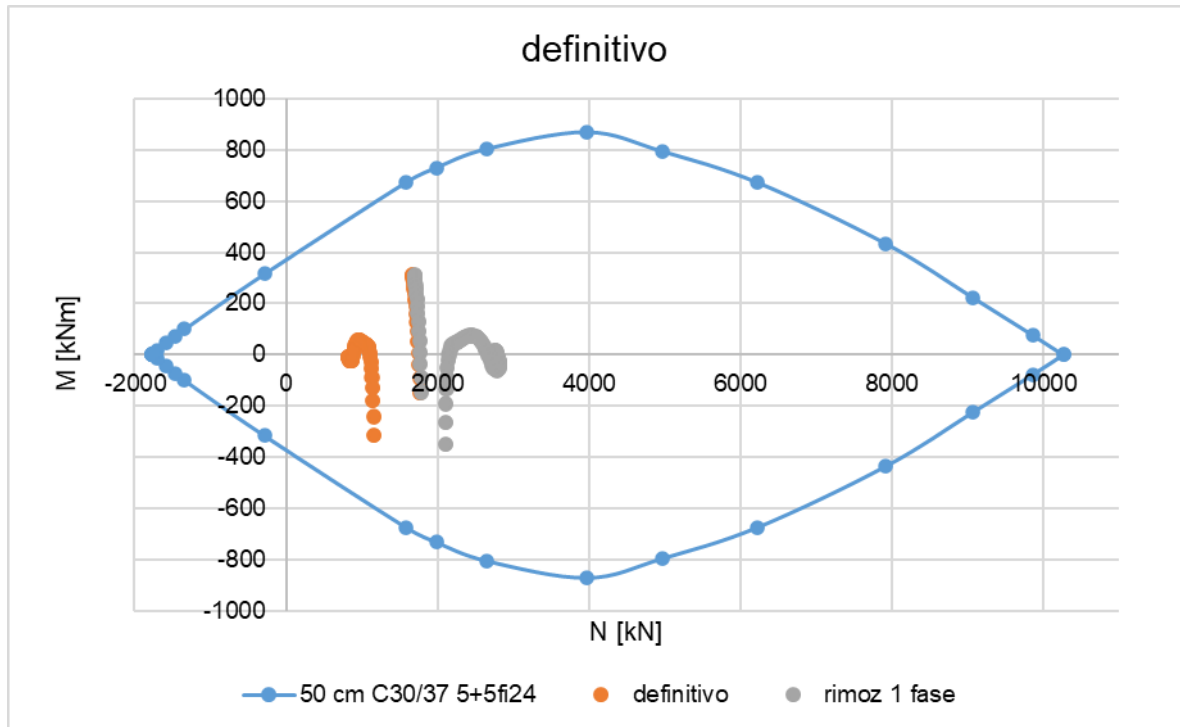


Figura 7.7 - Sezione tipo SGC1: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio la si registra durante l'ultima fase, quando si simula il decadimento del rivestimento di prima fase ed il rilascio sul rivestimento definitivo dei carichi da esso prima sostenuti, i valori maggiori li si ottiene negli spigoli tra piedritti ed arco rovescio dove si ha un punto singolare per cui la modellazione aumenta sensibilmente il valore reale (Figura 7.8). Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\varnothing 12$ con maglia 20×40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m , nell'intorno della giunzione tra piedritti ed arco rovescio è comunque consigliato infittire le staffe con passo 20×20 per un tratto di 1 m dall'intersezione, ottenendo così un taglio resistente di 1120 kN/m .

Come si vede in Figura 7.8 l'andamento delle tensioni di taglio subisce un repentino abbassamento allontanandosi dallo spigolo dimezzandosi ad una distanza di circa 20 cm dallo spigolo (freccia rossa). È quindi possibile non tenere in conto questi valori per le verifiche.

Così armata la sezione tipo SGC1 risulta verificata per le azioni ottenute dalla modellazione.

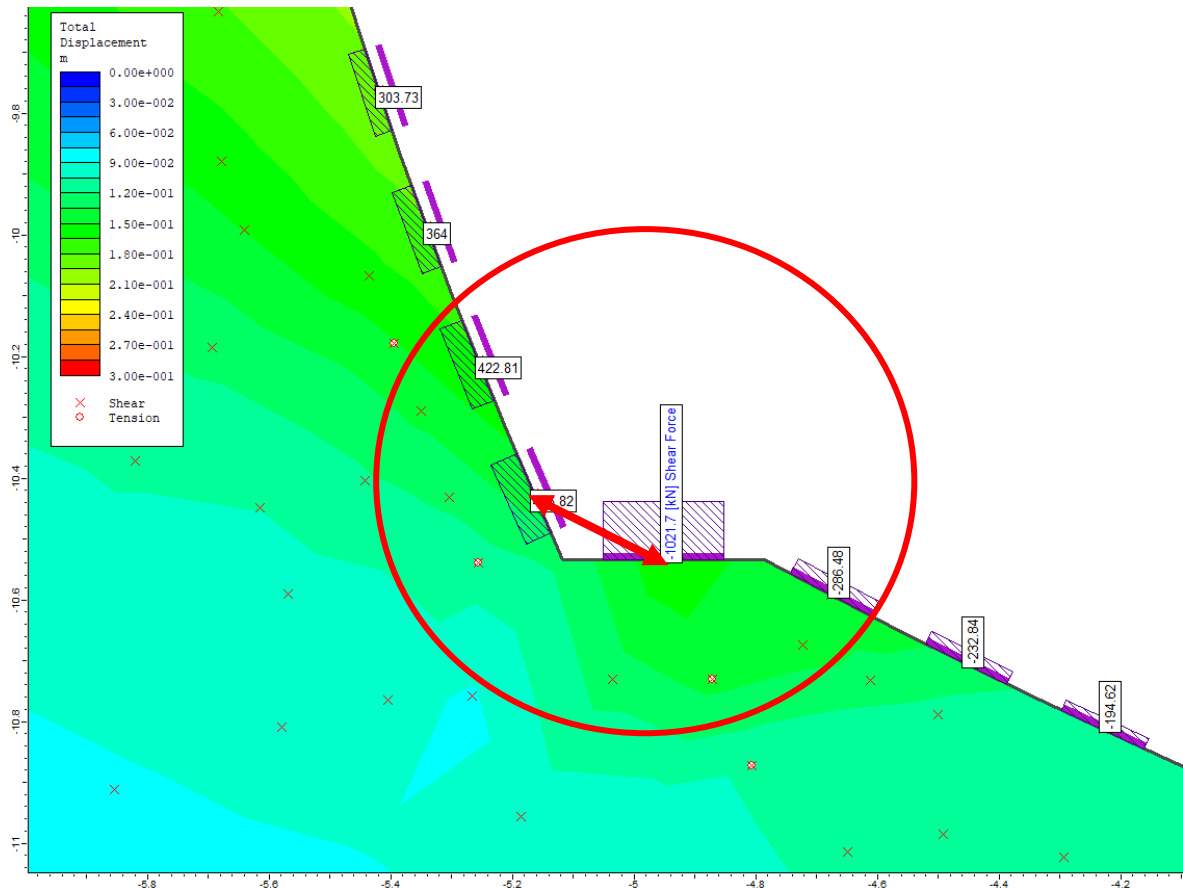


Figura 7.8 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio

7.5 Sezione tipo SGC2

7.5.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo SGC2 presenta un rivestimento di prima fase costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.9), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

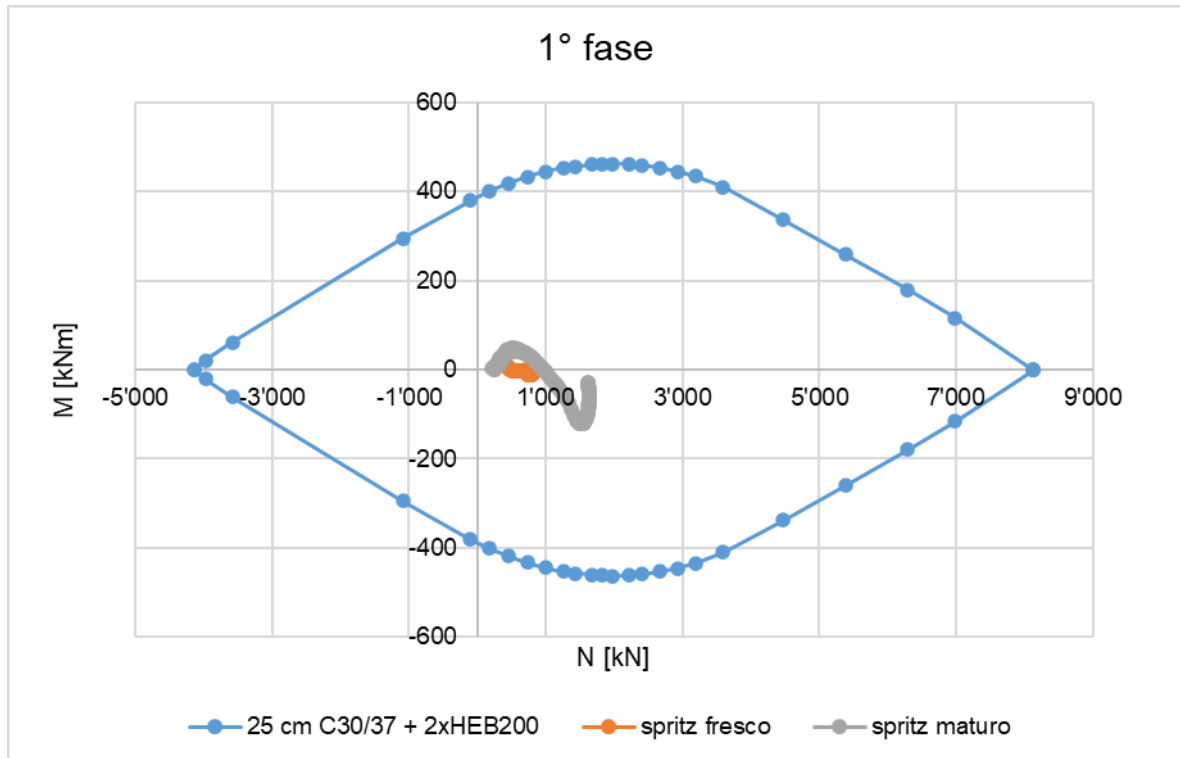


Figura 7.9 - Sezione tipo SGC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Per la verifica a taglio della sezione non si è tenuto conto dell'apporto di resistenza fornito delle fibre. Il rivestimento presenta resistenza a taglio pari a 723.7 kN/m, mentre la sollecitazione massima vale 258.3 kN/m la verifica risulta quindi soddisfatta.

7.5.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo SGC2 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 60 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 \varnothing 20 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.10), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

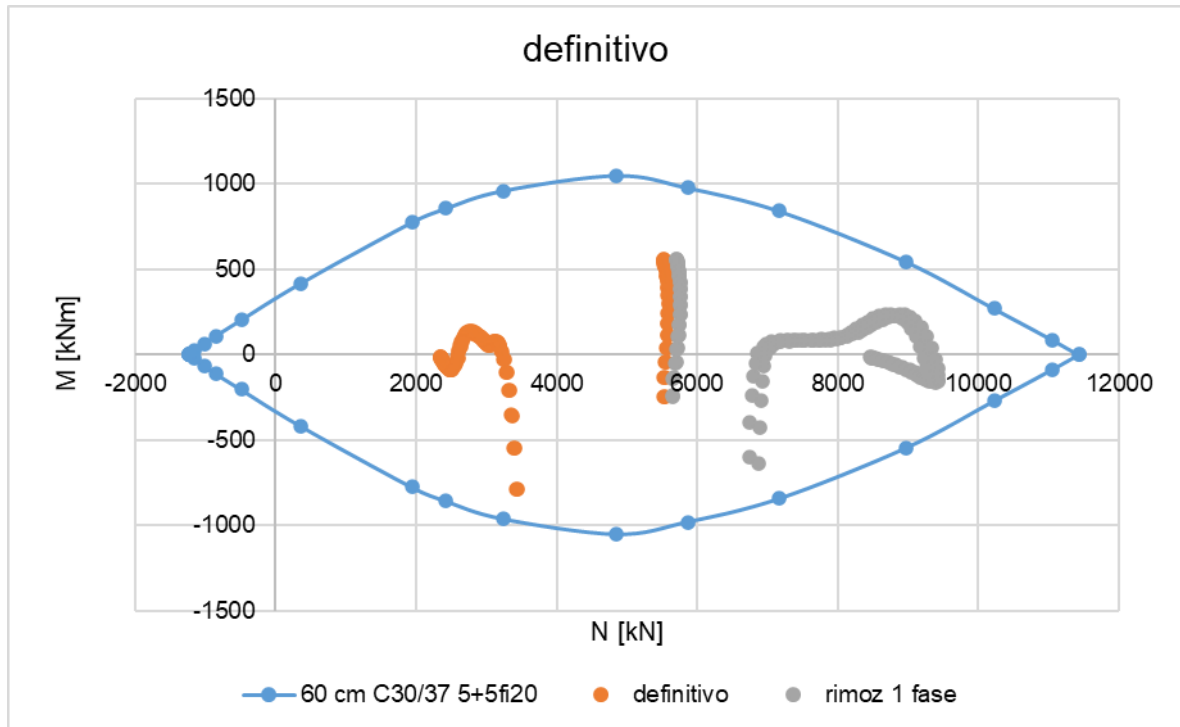


Figura 7.10 - Sezione tipo SGC2: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio la si registra durante l'ultima fase, quando si simula il decadimento del rivestimento di prima fase ed il rilascio sul rivestimento definitivo dei carichi da esso prima sostenuti, i valori maggiori li si ottiene negli spigoli tra piedritti ed arco rovescio dove si ha un punto singolare per cui la modellazione aumenta sensibilmente il valore reale (Figura 7.11). Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\varnothing 12$ con maglia 20×40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 684 kN/m , nell'intorno della giunzione tra piedritti ed arco rovescio è comunque consigliato infittire le staffe con passo 20×20 per un tratto di 1 m dall'intersezione, ottenendo così un taglio resistente di 1369 kN/m .

Come si vede in Figura 7.11 l'andamento delle tensioni di taglio subisce un repentino abbassamento allontanandosi dallo spigolo dimezzandosi ad una distanza di circa 60 cm dallo spigolo (freccia rossa). È quindi possibile non tenere in conto questi valori per le verifiche.

Così armata la sezione tipo SGC2 risulta verificata per le azioni ottenute dalla modellazione.

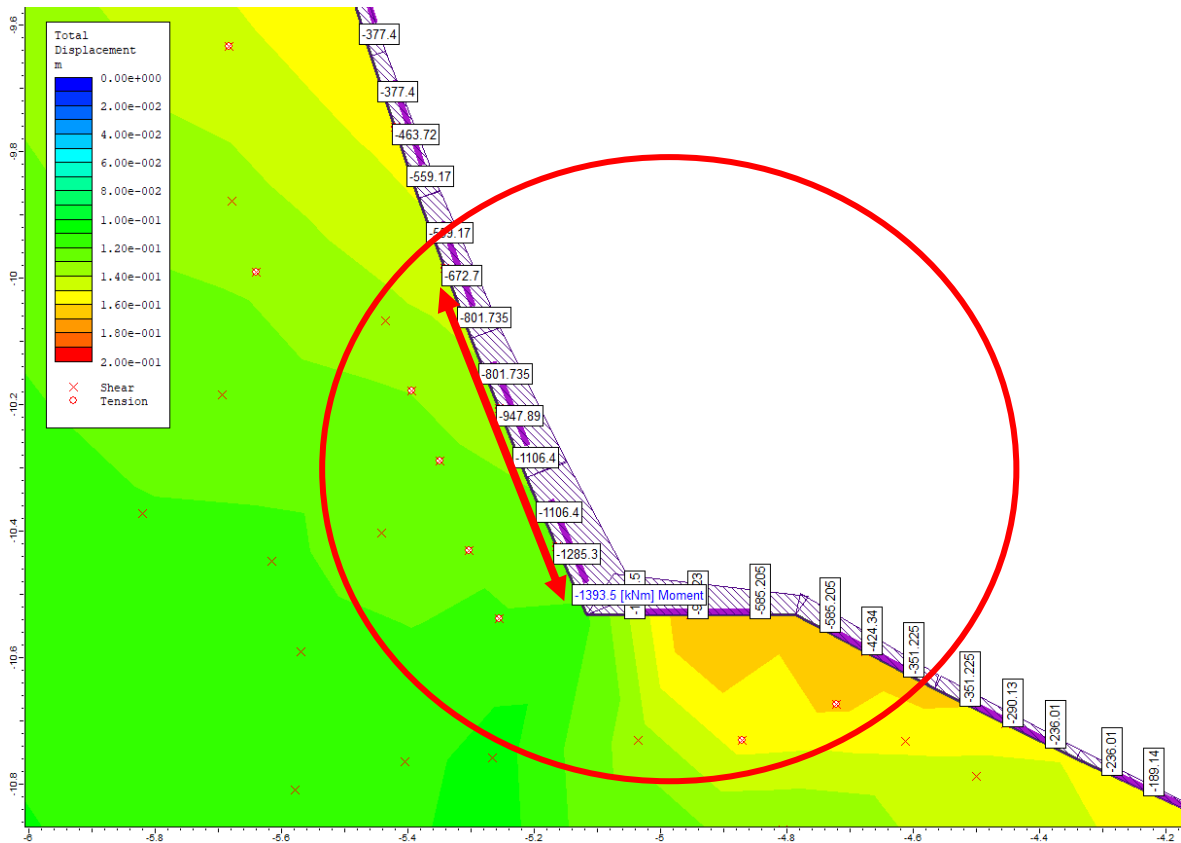


Figura 7.11 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio

7.6 Sezione tipo SGC1

7.6.1 Verifica del rivestimento di prima fase

La sezione tipo SGC3 presenta un rivestimento di prima fase costituito da:

- centine accoppiate HEB200 passo 1 m in acciaio S275
- calcestruzzo proiettato fibrorinforzato classe C30/37 con spessore 25 cm

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.12), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione.

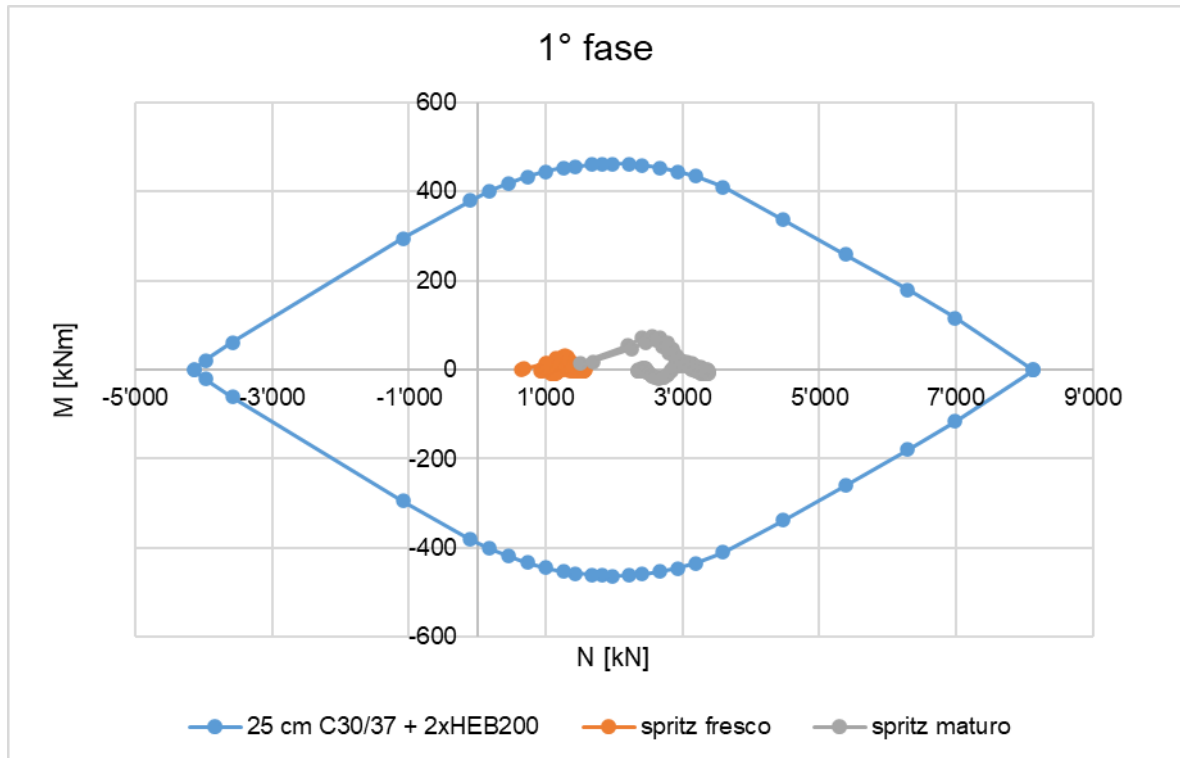


Figura 7.12 - Sezione tipo SGC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento di prima fase

Per la verifica a taglio della sezione non si è tenuto conto dell'apporto di resistenza fornito delle fibre. Il rivestimento presenta resistenza a taglio pari a 723.7 kN/m, mentre la sollecitazione massima vale 323.9 kN/m la verifica risulta quindi soddisfatta.

7.6.2 Verifica del rivestimento definitivo

La sezione tipo SGC3 presenta un rivestimento definitivo dello spessore di 50 cm, realizzato in calcestruzzo di classe C30/37 ed armato con 5+5 \varnothing 20 / m.

Come si può osservare dalla figura seguente (Figura 7.13), tutte le coppie di sollecitazione ricadono internamente al dominio di interazione e pertanto la verifica risulta soddisfatta per tutte le fasi di analisi.

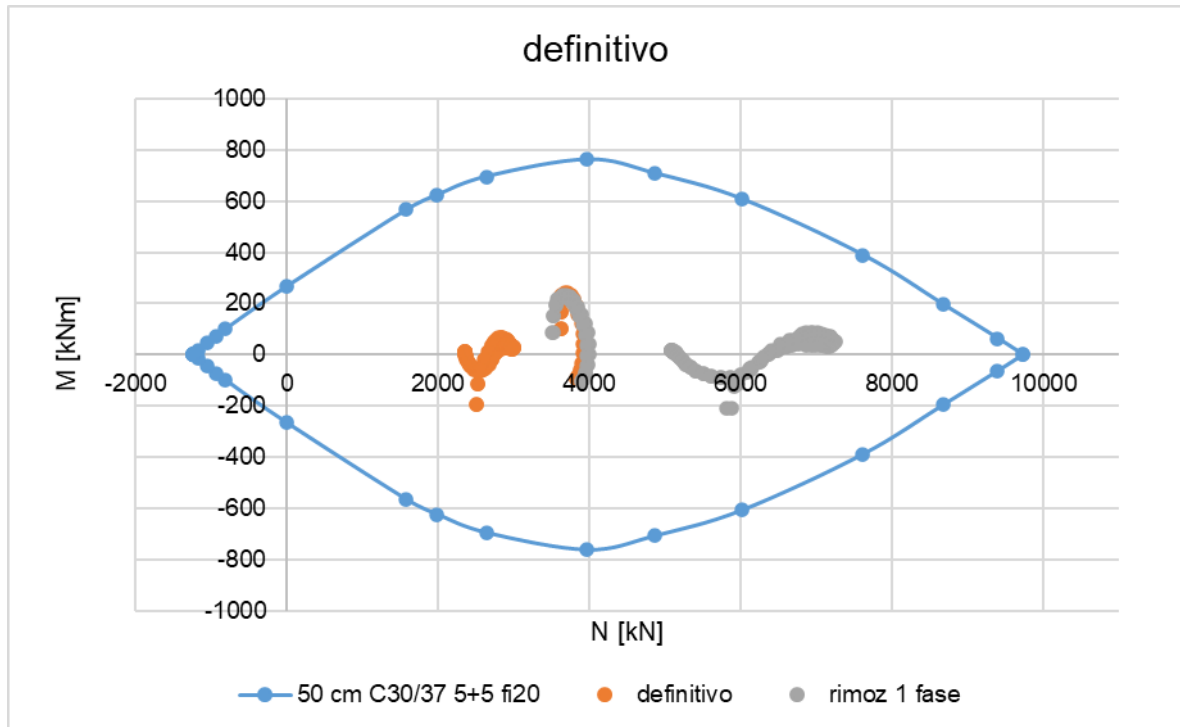


Figura 7.13 - Sezione tipo SGC3: Verifiche di pressoflessione per il rivestimento definitivo

La massima sollecitazione di taglio la si registra durante l'ultima fase, quando si simula il decadimento del rivestimento di prima fase ed il rilascio sul rivestimento definitivo dei carichi da esso prima sostenuti, i valori maggiori li si ottiene negli spigoli tra piedritti ed arco rovescio dove si ha un punto singolare per cui la modellazione aumenta sensibilmente il valore reale (Figura 7.14). Considerando la presenza di un'armatura a taglio costituita da staffe $\varnothing 12$ con maglia 20×40 cm si ottiene un taglio resistente pari a 560 kN/m , nell'intorno della giunzione tra piedritti ed arco rovescio è comunque consigliato infittire le staffe con passo 20×20 per un tratto di 1 m dall'intersezione, ottenendo così un taglio resistente di 1120 kN/m .

Come si vede in Figura 7.14 l'andamento delle tensioni di taglio subisce un repentino abbassamento allontanandosi dallo spigolo dimezzandosi ad una distanza di circa 20 cm dallo spigolo (freccia rossa). È quindi possibile non tenere in conto questi valori per le verifiche.

Così armata la sezione tipo SGC3 risulta verificata per le azioni ottenute dalla modellazione.

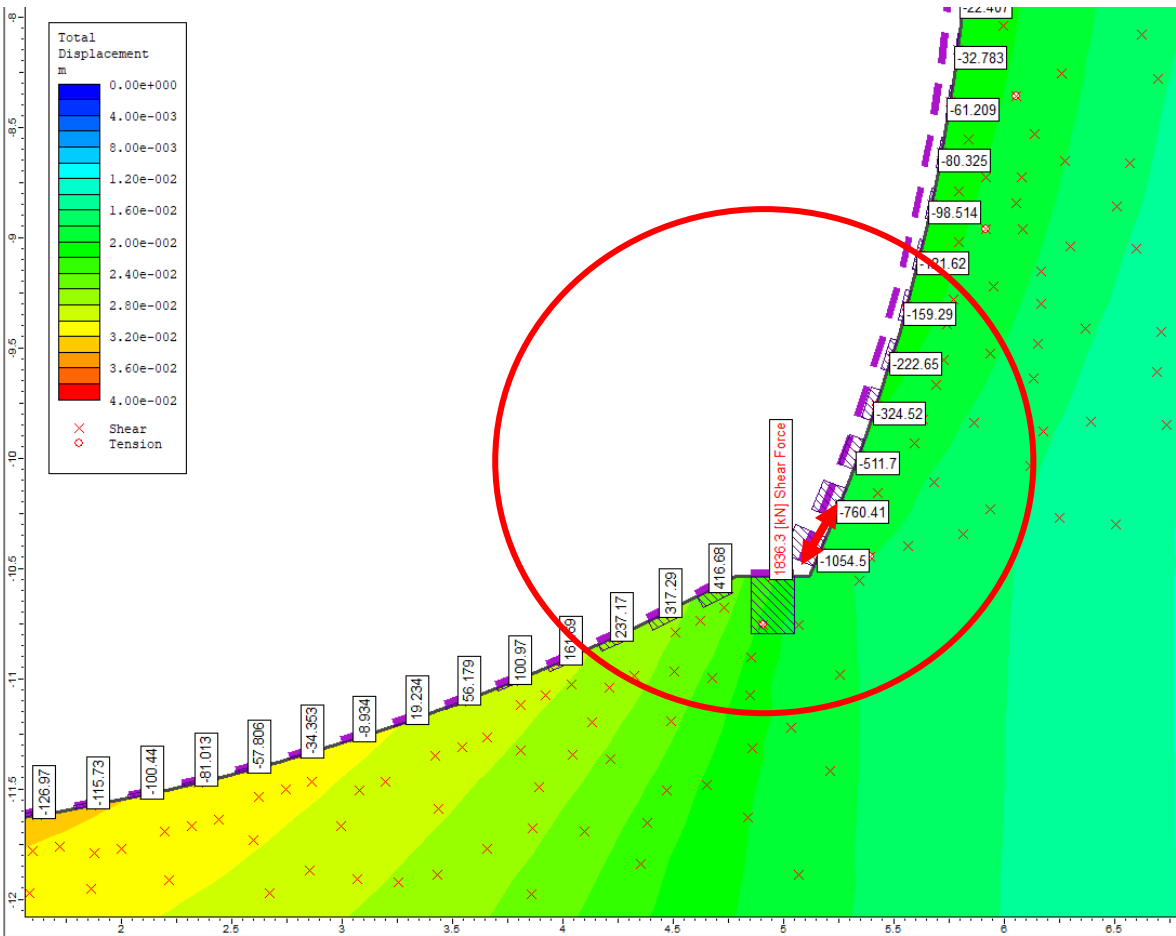


Figura 7.14 - Sezione SGC1: Andamento delle tensioni di di taglio

8. GALLERIE DI ACCESSO: STABILITÀ DEL FRONTE

La stabilità del fronte delle diverse sezioni tipo è stata verificata secondo la metodologia proposta da Anagnostou e Kovari (1996) per cui il meccanismo di collasso consiste in un cuneo frontale e di un corpo prismatico che poggia sullo stesso (Figura 8.1).

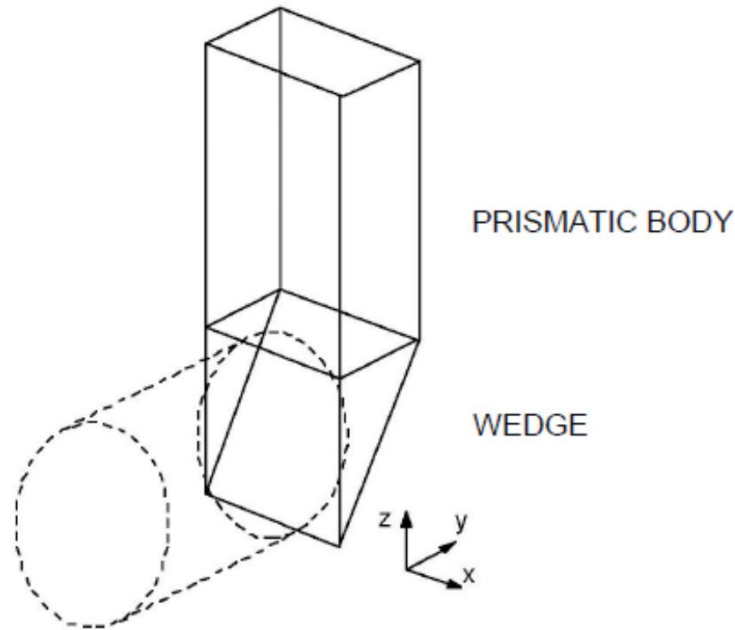


Figura 8.1 – Stabilità del fronte metodo di Anagnostou & Kovari (1996)

La stabilità del fronte si basa sulla verifica all'Equilibrio Limite di tutte le forze che agiscono sul sistema, come schematizzate nella Figura 8.2 seguente.

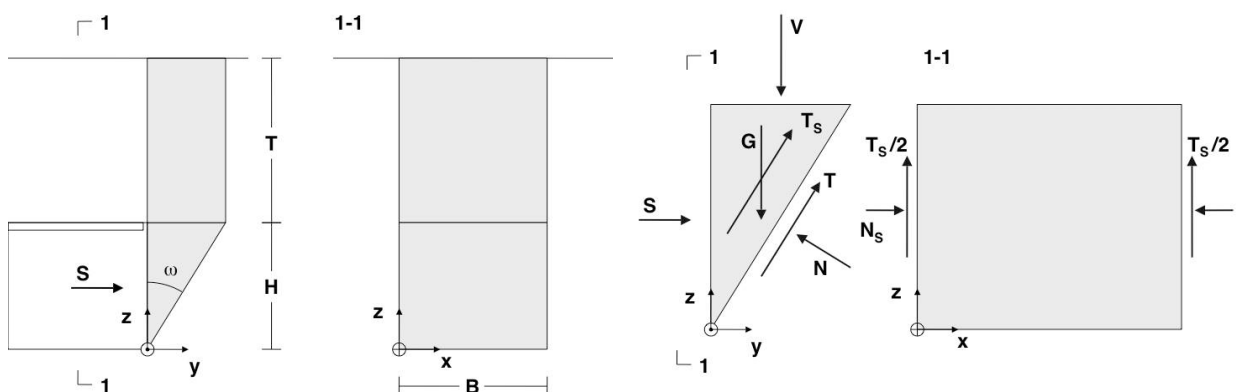


Figura 8.2 – Schema geometrico e forze agenti metodo di Anagnostou & Kovari (1996)

La risultante S è così calcolata:

- per il lungo termine o breve termine in terreni permeabili
- per il breve termine in terreni poco permeabili

$$S = \begin{cases} \frac{V + G}{\tan(\omega + \phi)} - \frac{T_s + c' \frac{B \cdot H}{\cos \omega}}{\cos \omega \cdot (\tan \omega + \tan \phi)} & (a) \\ B \cdot H \left(\sigma_{v,rid} + \frac{1}{2} \gamma \cdot H \right) - 2H \cdot S_u \frac{H \sin \omega + B}{\sin 2\omega} & (b) \end{cases}$$

con:

$$\begin{aligned} V &= F \cdot \sigma_{v,rid} \\ G &= \frac{1}{2} B \cdot H \cdot l \cdot \gamma \\ T_s &= \begin{cases} H^2 \tan \omega \cdot \left(c' + \lambda_k \tan \phi \frac{2\sigma_{v,rid} + H \cdot \gamma}{3} \right) & (a) \\ S_u \cdot H^2 \tan \omega & (b) \end{cases} \\ T_b &= \begin{cases} c' \cdot \left(B \cdot \frac{H}{\cos \omega} \right) + (V + G) \cdot \sin \omega \cdot \tan \phi' & (a) \\ S_u \cdot \left(B \cdot \frac{H}{\cos \omega} \right) & (b) \end{cases} \\ \sigma_{v,rid} &= \begin{cases} \left[\frac{R \cdot \gamma - c'}{\lambda \cdot \tan \phi} \cdot \left(1 - e^{(-\lambda \cdot \tan \phi \frac{T}{R})} \right) \right] & (a) \\ T \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{S_u}{R \cdot \gamma} \right) & (b) \end{cases} \end{aligned}$$

dove:

- V è il carico agente sul cuneo al fronte
- G è il peso del prisma al fronte
- ω è l'inclinazione del piano di scivolamento del prisma al fronte
- ϕ è l'angolo d'attrito del terreno
- T_s è l'attrito che si sviluppa sulle facce laterali del prisma
- c' è la coesione drenata del terreno
- B è la larghezza della galleria
- H è l'altezza della galleria
- $\sigma_{v,rid}$ è il carico verticale ridotto
- γ è il peso specifico del terreno
- S_u è la coesione non drenata del terreno
- l è la profondità del parallelepipedo
- λ_k è il coefficiente d'attrito delle facce laterali del prisma al fronte
- T_b è l'attrito che si sviluppa sulla faccia inferiore del prisma al fronte
- R è il rapporto tra l'area ed il perimetro della base del parallelepipedo
- λ è il coefficiente d'attrito delle facce laterali del parallelepipedo

La forza applicata dagli elementi in VTR al fronte può essere calcolata come la sommatoria della forza applicata da ogni singolo elemento calcolabile secondo lo schema in Figura 8.3 come:

$$S_k = \min \begin{cases} F_b \\ T_w = \pi \cdot d_{foro} \cdot \tau_m \cdot a_k \\ T_b = \pi \cdot d_{foro} \cdot \tau_m \cdot (L - a_k) \end{cases}$$

dove:

- F_b è il carico a rottura della barra in VTR
- T_w è la forza di sfilamento del cuneo dalla barra
- d_{foro} è il diametro di perforazione
- τ_m è l'attrito laterale
- a_k è la lunghezza di barra all'interno del cuneo $a_k = 0.5H \cdot \tan \omega$
- T_b è la forza di sfilamento della barra oltre il cuneo al fronte
- L è la lunghezza della barra, coincidente con la lunghezza di sovrapposizione

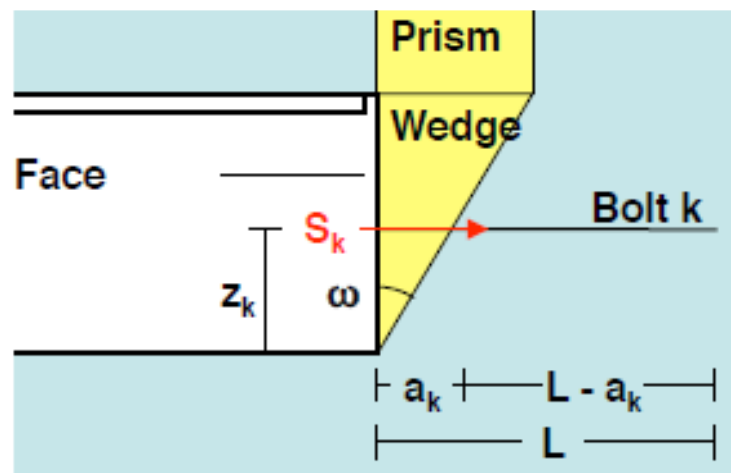


Figura 8.3 – Schema di calcolo della forza applicata dall'elemento al fronte

Essendo un problema geometrico e avendo una disposizione pressochè omogenea sul fronte è possibile semplificare la sommatoria delle forze applicate dai singoli elementi al fronte come la forza applicata dall'elemento posizionato a metà altezza di scavo moltiplicato per il numero totale di elementi in VTR.

Il Fattore di Sicurezza della stabilità del fronte di scavo è, quindi, così calcolabile:

- per il lungo termine o breve termine in terreni permeabili
- per il breve termine in terreni poco permeabili

$$FS = \begin{cases} \frac{T_s + c'_{fronte} \frac{B \cdot H}{\cos \omega}}{\cos \omega \cdot (\tan \omega + \tan \phi)} + \frac{S_{sist}}{V + G} & (a) \\ \frac{2H \cdot S_{u,fronte} \frac{H \sin \omega + B}{\sin 2\omega} + S_{sist}}{B \cdot H \left(\sigma_{v,rid} + \frac{1}{2} \gamma \cdot H \right)} & (b) \end{cases}$$

8.1 Stabilità dei fronti di scavo delle sezioni tipo

La stabilità dei fronti di scavo è stata valutata per le sezioni tipo previste nella formazione di Terravecchia (TRVa) e nelle marne d Enna (ENNa).

8.1.1 Sezione SGPz1

GEOMETRIA					
copertura	T	m		155	
altezza galleria	H	m		9.2	
larghezza galleria	B	m		9.65	
area fronte di scavo	A	m ²		73.75	
profondità parallelepipedo	l	m		5.97	
angolo prisma al fronte	ω	°		33.000	
area base parallelepipedo	F	m ²		57.65441	
perimetro base parallelepipedo	U	m		31.2491	
rapporto area/perimetro base	R	m		1.84	
TERRENO DI SCAVO				caratt	design
peso specifico	γ	kN/m ³		20	20.00
coesione drenata / non drenata	c' / S_u	kPa		60	48.00
angolo d'attrito	ϕ'	°		24	19.61
FORZE				caratt	design
coefficiente attrito laterale parallelepipedo	λ	.		0.8	
coefficiente attrito laterale prisma	λ_k	.		0.4	
carico verticale ridotto	$\sigma_{v,rid}$	kPa		-64.85	-38.96
peso scaricato del parallelepipedo di terreno	V	kN		0.00	0.00
peso prisma di terreno	G	kN		5304.205	5304.205
attrito laterale sulla faccia del prisma	T_s	kN		3475.10	2915.30
forza necessaria al supporto del fronte	S	kN		-7259.29	-5427.07
verifica stabilità fronte senza supporti in VTR	.	si/no		si	si
		FS		3.11	2.34

La sezione SGPz1 risulta stabile anche senza l'ausilio di elementi in VTR al fronte, che possono comunque essere previsti nel caso di eccessiva estrusione dello stesso o di peggioramento dei parametri geotecnici del terreno.

8.1.2 Sezione SGPz1*

La stabilità del fronte della sezione SGPz1* risulta verificata senza l'uso di VTR.

GEOMETRIA					
copertura	T	m	215		
altezza galleria	H	m	9.2		
larghezza galleria	B	m	9.65		
area fronte di scavo	A	m ²	73.75		
profondità parallelepipedo	l	m	5.31		
angolo prisma al fronte	ω	°	30.000		
area base parallelepipedo	F	m ²	51.25716		
perimetro base parallelepipedo	U	m	29.92324		
rapporto area/perimetro base	R	m	1.71		
TERRENO DI SCAVO				caratt	design
peso specifico	γ	kN/m ³	24	24.00	
coesione drenata / non drenata	c' / S_u	kPa	573	458.40	
angolo d'attrito	ϕ'	°	30	24.79	
FORZE				caratt	design
coefficiente attrito laterale parallelepipedo	λ	.	0.8		
coefficiente attrito laterale prisma	λ_k	.	0.4		
carico verticale ridotto	$\sigma_{v,rid}$	kPa	-1151.57	-1129.32	
peso scaricato del parallelepipedo di terreno	V	kN	0.00	0.00	
peso prisma di terreno	G	kN	5658.79	5658.79	
attrito laterale sulla faccia del prisma	T_s	kN	20167.42	16267.87	
forza necessaria al supporto del fronte	S	kN	-75641	-66296.2	
verifica stabilità fronte senza supporti in VTR	.	si/no	si	si	
		FS	24.15	17.60	

8.1.3 Sezione SGC1

Il fronte della sezione tipo SGC1 non risulta stabile senza l'ausilio di barre in VRT, si prevede quindi l'uso di 60 barre in VTR di lunghezza 24 m sovrapposte di 12 m così da garantire un buon immorsamento oltre il fronte.

GEOMETRIA					
copertura	T	m	155		
altezza galleria	H	m	11.75		
larghezza galleria	B	m	11.7		
area fronte di scavo	A	m ²	111.38		
profondità parallelepipedo	l	m	8.69		
angolo prisma al fronte	ω	°	36.500		
area base parallelepipedo	F	m ²	101.7261		
perimetro base parallelepipedo	U	m	40.78909		
rapporto area/perimetro base	R	m	2.49		
TERRENO DI SCAVO				caratt	design
peso specifico	γ	kN/m ³	20	20.00	

coesione drenata / non drenata	c' / S_u	kPa	26	20.80
angolo d'attrito	ϕ'	°	17	13.74
FORZE			caratt	design
coefficiente attrito laterale parallelepipedo	λ	.	0.8	
coefficiente attrito laterale prisma	λ_k	.	0.4	
carico verticale ridotto	$\sigma_{v,rid}$	kPa	97.63	148.61
peso scaricato del parallelepipedo di terreno	V	kN	9931.65	15117.93
peso prisma di terreno	G	kN	11952.82	11952.82
attrito laterale sulla faccia del prisma	T_s	kN	4448.01	3898.12
forza necessaria al supporto del fronte	S	kN	5612.345	13099.42
verifica stabilità fronte senza supporti in VTR	.	si/no	no	no
		FS	0.65	0.42
SISTEMA VTR			caratt	design
lunghezza barre VTR	L	m	24	
sovrapposizione barre VTR	L-l	m	12	
diametro foro per barre	d_{foro}	m	0.1	
attrito laterale	τ_m	kPa	250	200.00
numero di barre in VTR	N	.	60	
BARRA VTR			caratt	design
carico di rottura barra VTR	F_b	kN	350	304.35
diametro esterno barra VTR	d_e	mm	60	
spessore barra VTR	s_b	mm	10	
lunghezza minima barra VTR	L-l	m	12	
immorsamento medio barra VTR nel cuneo	a_k	m	4.35	
immorsamento medio barra VTR nell'ammasso	$(L-l)-a_k$	m	7.65	
forza sfilamento del cuneo dalla barra in VTR	T_w	kN	341.4	273.1
forza sfilamento barra VTR dall'ammasso	T_b	kN	601.0	480.8
forza applicata da una singola barra in VTR	S_k	kN	341.4	273.1
forza applicata dal sistema di barre in VTR	S_{sist}	kN	20486.03	16388.83
verifica sistema VTR ipotizzato	.	si/no	si	si
		FS	1.92	1.15

8.1.4 Sezione SGC2

La sezione SGC2 risulta stabile senza l'ausilio di barre in VTR al fronte grazie all'aumento dei parametri geotecnici con la profondità, è comunque bene prevederne l'uso in caso di eccessiva estrusione del fronte o in caso di peggioramento dei parametri geotecnici.

GEOMETRIA				
copertura	T	m	280	
altezza galleria	H	m	11.75	
larghezza galleria	B	m	11.7	
area fronte di scavo	A	m ²	111.38	

profondità parallelepipedo	l	m	7.34	
angolo prisma al fronte	ω	°	32.000	
area base parallelepipedo	F	m ²	85.90391	
perimetro base parallelepipedo	U	M	38.08443	
rapporto area/perimetro base	R	M	2.26	
TERRENO DI SCAVO			caratt	design
peso specifico	γ	kN/m ³	20	20.00
coesione drenata / non drenata	c' / S_u	kPa	80	64.00
angolo d'attrito	ϕ'	°	26	21.32
FORZE			caratt	design
coefficiente attrito laterale parallelepipedo	λ	.	0.8	
coefficiente attrito laterale prisma	λ_k	.	0.4	
carico verticale ridotto	$\sigma_{v,rid}$	kPa	-89.41	-60.51
peso scaricato del parallelepipedo di terreno	V	kN	0.00	0.00
peso prisma di terreno	G	kN	10093.71	10093.71
attrito laterale sulla faccia del prisma	T_s	kN	7216.84	6032.93
forza necessaria al supporto del fronte	S	kN	-15086.1	-11541.3
verifica stabilità fronte senza supporti in VTR	.	si/no	si	si
		FS	3.39	2.53

9. GALLERIA IDRAULICA: ANALISI TENSIO-DEFORMATIVE

In virtù della geometria perfettamente circolare tipica delle gallerie scavate con metodo meccanizzato, sulla galleria idraulica sono state effettuate una serie di analisi parametriche con il metodo della curva caratteristica, in modo da valutare la funzionalità del rivestimento previsto dal progetto in funzione delle diverse condizioni di copertura e delle diverse litologie attraversate dall'opera.

9.1 Metodo convergenza-confinamento

Il comportamento della galleria allo scavo è funzione dello stato tensionale originario nell'ammasso roccioso e delle relative caratteristiche di resistenza e deformabilità.

Una valutazione preliminare di tale comportamento è stata effettuata con il metodo convergenza-confinamento, impiegando il software Rocsupport; questo schema di calcolo considera l'ipotesi di simmetria radiale del cavo (foro circolare), ubicato in un mezzo omogeneo ed isotropo, a caratteristiche note di deformabilità e resistenza. Il procedimento fornisce gli spostamenti al contorno della galleria e l'estensione della fascia plastica, per uno stato tensionale originario supposto isotropo.

La curva caratteristica della galleria, definita dalla relazione tra la pressione interna (p_i) e lo spostamento radiale del contorno (u_r), viene ottenuta riducendo la pressione di sostegno da un valore pari a quello competente allo stato di tensione originario ($p_i = p_o$) ad un valore nullo; per ogni pressione, vengono calcolati il corrispondente spostamento e l'estensione della zona in condizioni plastiche.

In particolare, è stata svolta una serie di analisi considerando i valori previsti per le caratteristiche di deformabilità e resistenza del terreno associate alle diverse coperture, e dunque stati tensionali, previsti per la galleria in progetto.

In accordo con quanto assunto in sede di caratterizzazione, il terreno è stato schematizzato come un mezzo omogeneo con comportamento elasto-plastico ideale e dilatanza nulla; per l'ammasso roccioso si è fatto riferimento al criterio di resistenza di Hoek e Brown, mentre per le i terreni si è fatto riferimento al criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

I parametri di resistenza e di deformabilità assunti nelle diverse analisi sono nei paragrafi seguenti.

Lo stato tensionale iniziale è stato assunto pari allo stato tensionale geostatico considerando:

- un peso di volume per l'ammasso roccioso caratteristico del litotipo considerato di volta in volta lungo il tracciato
- una copertura variabile tra 30 e 300 m a seconda della tratta considerata.

Il metodo impiegato consente di tener conto nella definizione del modello di calcolo anche della presenza di un eventuale rivestimento. In questo caso, oltre alla curva caratteristica della galleria viene calcolata anche la curva caratteristica del sostegno, la quale esprime la relazione tra la pressione esterna, supposta radiale, uniforme e applicata all'estradosso del rivestimento, e la relativa convergenza. Assumendo lineare la relazione carico-deformazione, si definisce una costante di rigidità (KS) di un anello continuo rappresentativo del rivestimento. Nel caso in cui venga assunto un comportamento del supporto elastico perfettamente plastico è necessario definire, oltre alla rigidità, anche il valore del carico a rottura ammesso per il rivestimento stesso.

La posizione della curva caratteristica del rivestimento sul diagramma convergenza-confinamento può essere definita in funzione della distanza di posa del rivestimento dal fronte di scavo. Nel caso di una galleria scavata con metodo meccanizzato si ha una pressione di confinamento al fronte data dalla testa di scavo, la quale contrasta le deformazioni del fronte antecedenti la posa del rivestimento. Allo stesso tempo lo scudo della macchina ha una forma trapezoidale, per cui genera un sovrascavo di entità compresa mediamente tra i 5 ed i 10 cm, il quale viene immediatamente riempito con una malta di intasamento. Tale sovrascavo darà comunque luogo ad una convergenza, valutabile nel nostro caso in un massimo di 15 cm, la quale si verifica preliminarmente alla posa dei conci di rivestimento; tale valore della convergenza è stato impiegato per posizionare, in via preliminare, le curve caratteristiche del rivestimento sul diagramma convergenza-confinamento.

Infine dall'intersezione tra la curva caratteristica della galleria e la curva caratteristica del rivestimento è possibile definire la pressione agente su quest'ultimo (Figura 9.1)

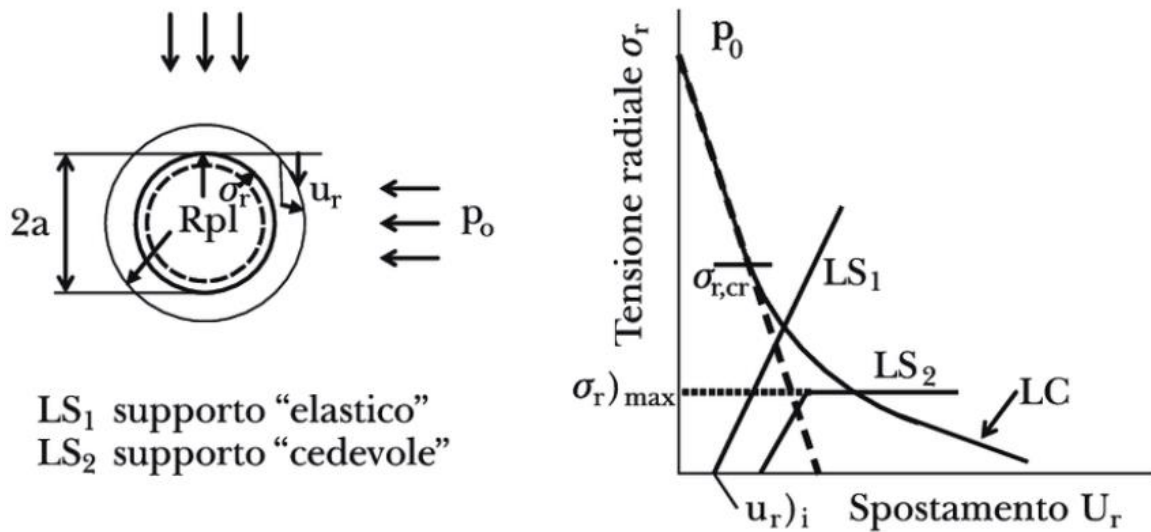


Figura 9.1 – Metodo convergenza-confinamento: curva caratteristica della galleria (LC), del sostegno ipotizzato perfettamente elastico (LS1) e del sostegno ipotizzato elastico perfettamente plastico (LS2)

Vale evidenziare che, a causa delle ipotesi semplificative introdotte (stato tensionale idrostatico e mezzo continuo equivalente), le analisi effettuate con il metodo delle curve caratteristiche non permettono di valutare eventuali locali anomalie, legate ad anisotropia dello stato tensionale o instabilità legate a discontinuità, ma permettono comunque di evidenziare il comportamento globale allo scavo degli ammassi rocciosi, in particolar modo per le classi meno competenti dove il mezzo ha effettivamente comportamento continuo equivalente.

Nei paragrafi seguenti vengono riportati i risultati delle analisi condotte con il metodo delle curve caratteristiche per i diversi litotipi attraversati dalla galleria idraulica; per ciascun litotipo sono stati considerati diversi valori della copertura al fine di verificare l'efficacia del rivestimento nelle diverse condizioni di carico a cui questo verrà sottoposto.

9.2 Analisi con il metodo convergenza-confinamento

Allo stato attuale delle conoscenze sulla geologia attesa in sito si prevede di imboccare la galleria idraulica nella Formazione di Terravecchia (TRVa), dopo circa 50 m è previsto un primo passaggio nelle Argille Varicolori (AV). Da questo punto, per i successivi 4115 m circa, la galleria risulta collocata in prossimità del contatto tra la TRVa e la sottostante AV ed attraversa ora una formazione ora l'altra in funzione della progressiva e della relativa copertura. Superata la progressiva 4161 (valutata dall'imbocco) si presume che la galleria prosegua nelle formazioni appartenenti alla Serie Evaporitica, incontrando per un brevissimo tratto il Calcare di base (GTL1) e nel suo tratto terminale i Gessi (GTL2).

Si riportano di seguito le analisi effettuate sulle diverse litologie per diversi valori della copertura ritenuti significativi al fine del predimensionamento del rivestimento della galleria. In particolare si riportano i valori della fascia plastica nell'intorno della galleria (in presenza ed in assenza del sostegno offerto dal rivestimento) e i diagrammi di convergenza confinamento valutati per la galleria e per il sostegno secondo le modalità illustrate al Paragrafo 9.1 della presente relazione.

9.2.1 Analisi nella Argille Varicolori (AV)

Si riportano di seguito i dati di input ed i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sulle Argille Varicolori (AV) per le diverse coperture significative:

Tabella 9.1 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

Sezione di analisi	Copertura (m)	In-Situ Stress (MPa)	E (MPa)	c' (MPa)	φ (°)	Rivestimento
AV-1	50	1	150	0.08	25	30 cm C30/37
AV-2	115	2.3	400	0.08	25	
AV-3	200	4	500	0.08	25	

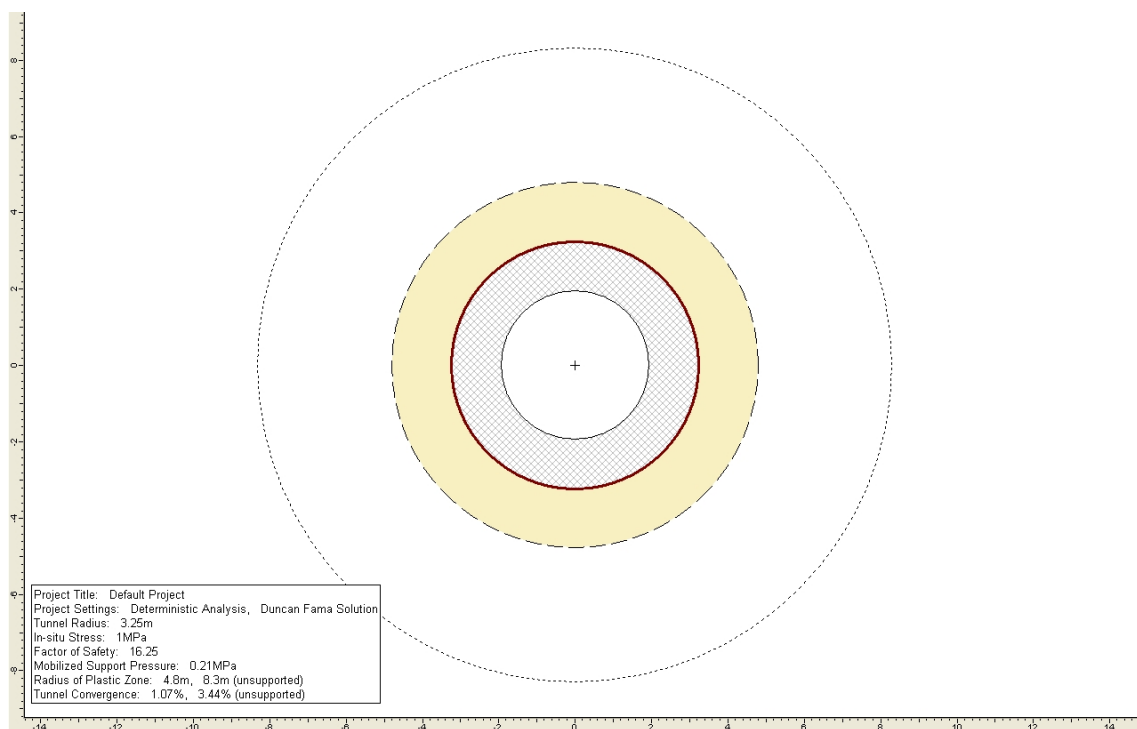


Figura 9.2 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=50m)

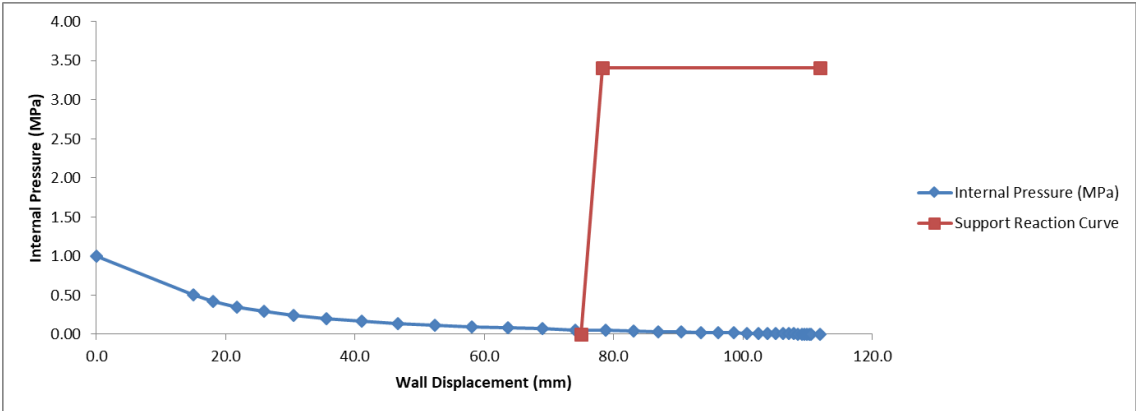


Figura 9.3 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=50m)

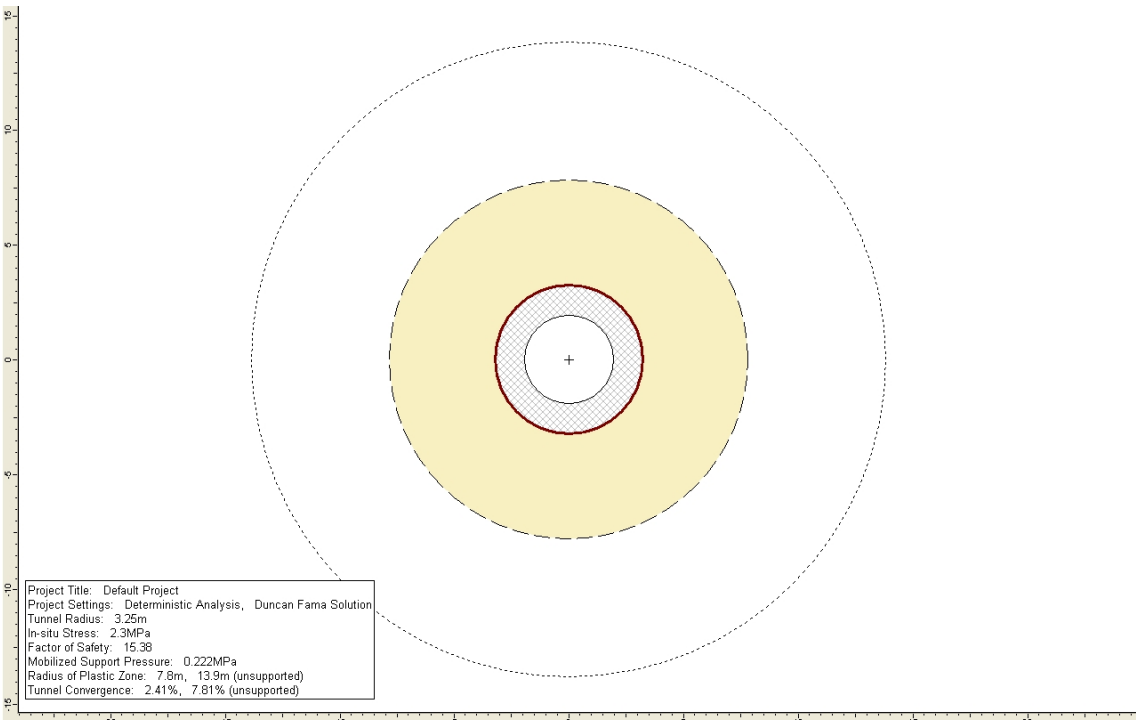


Figura 9.4 Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=115m)

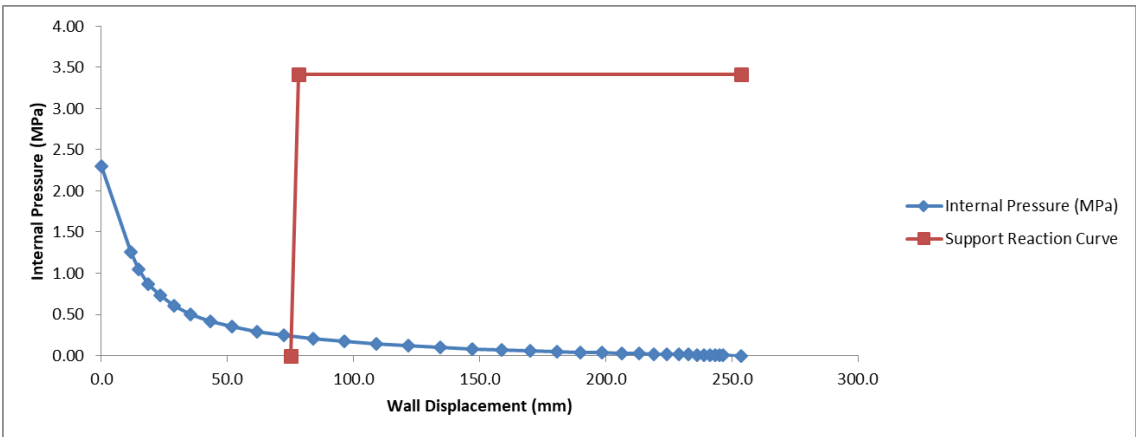


Figura 9.5 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=115m)

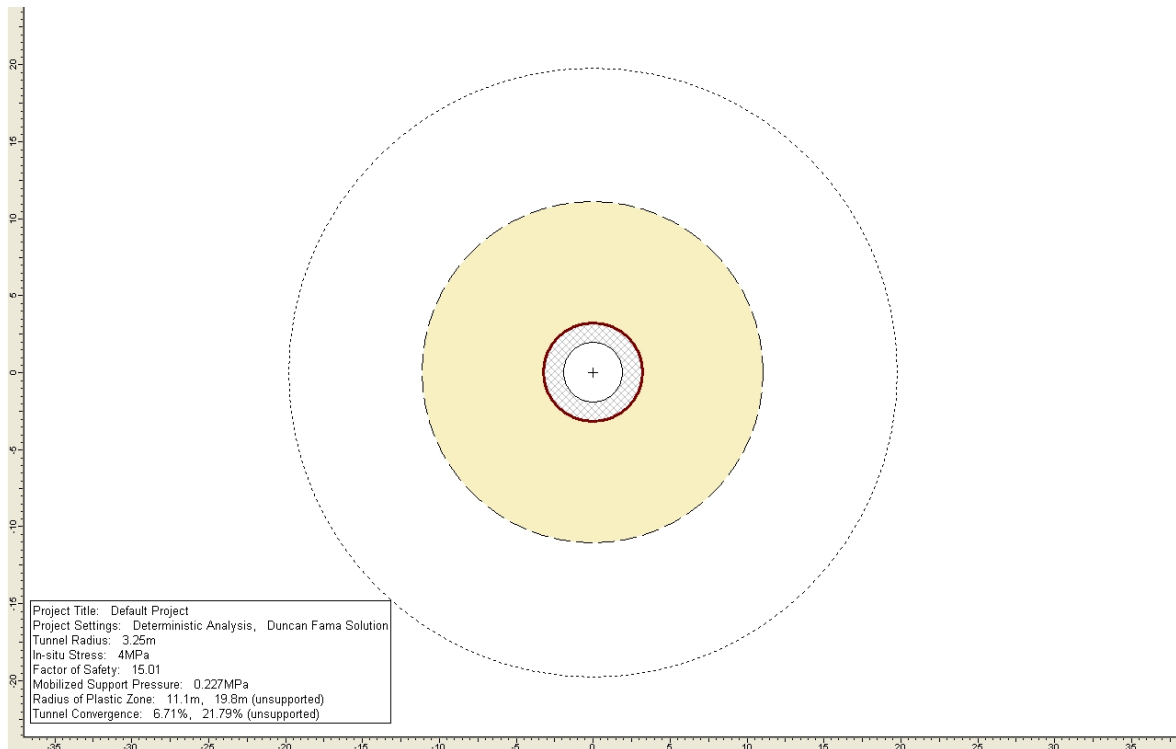


Figura 9.6 Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (AV - Z=200m)

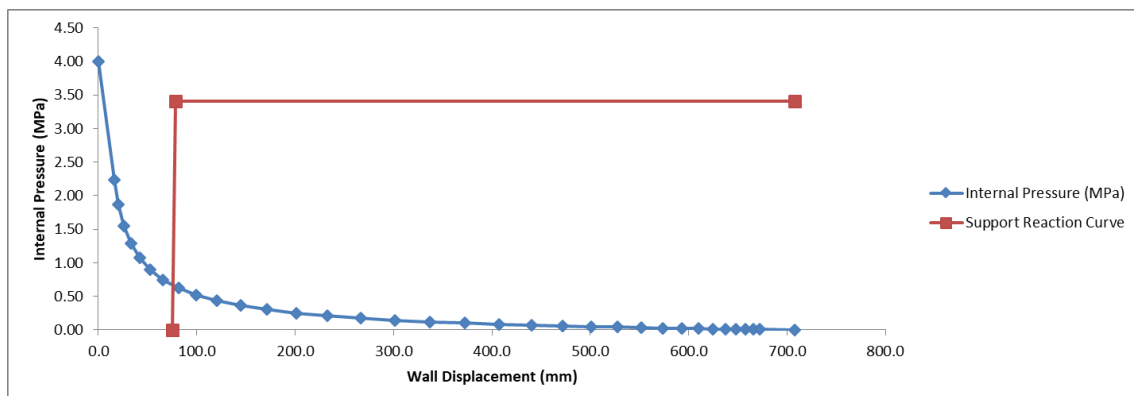


Figura 9.7 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (AV - Z=200m)

Come si può osservare dalle immagini riportate sopra:

- La fascia di terreno plasticizzato, nel caso di cavo sostenuto, assume uno spessore compreso tra 1.55 m (valutato alla profondità di 50 m) e 7.85 m (valutato alla profondità di 200 m)
- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento della galleria assumono, in tutti i casi analizzati, valori modesti se rapportati al valore di resistenza offerto dalla sezione reagente. Le verifiche di predimensionamento del supporto possono dunque considerarsi soddisfatte.

9.2.2 Analisi nella Formazione di Terravecchia (TRVa)

Si riportano di seguito i dati di input ed i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sulla Formazione di Terravecchia (TRVa) per le diverse coperture significative:

Tabella 9.2 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

Sezione di analisi	Copertura (m)	In-Situ Stress (MPa)	E (MPa)	c' (MPa)	ϕ (°)	Rivestimento
TRVa-1	30	0.6	250	0.024	17	30 cm C30/37
TRVa-2	60	1.2	300	0.030	18	
TRVa-3	100	2	350	0.050	22	
TRVa-4	135	2.7	400	0.060	24	
TRVa-5	200	4	500	0.080	26	
TRVa-6	300	6	700	0.080	26	

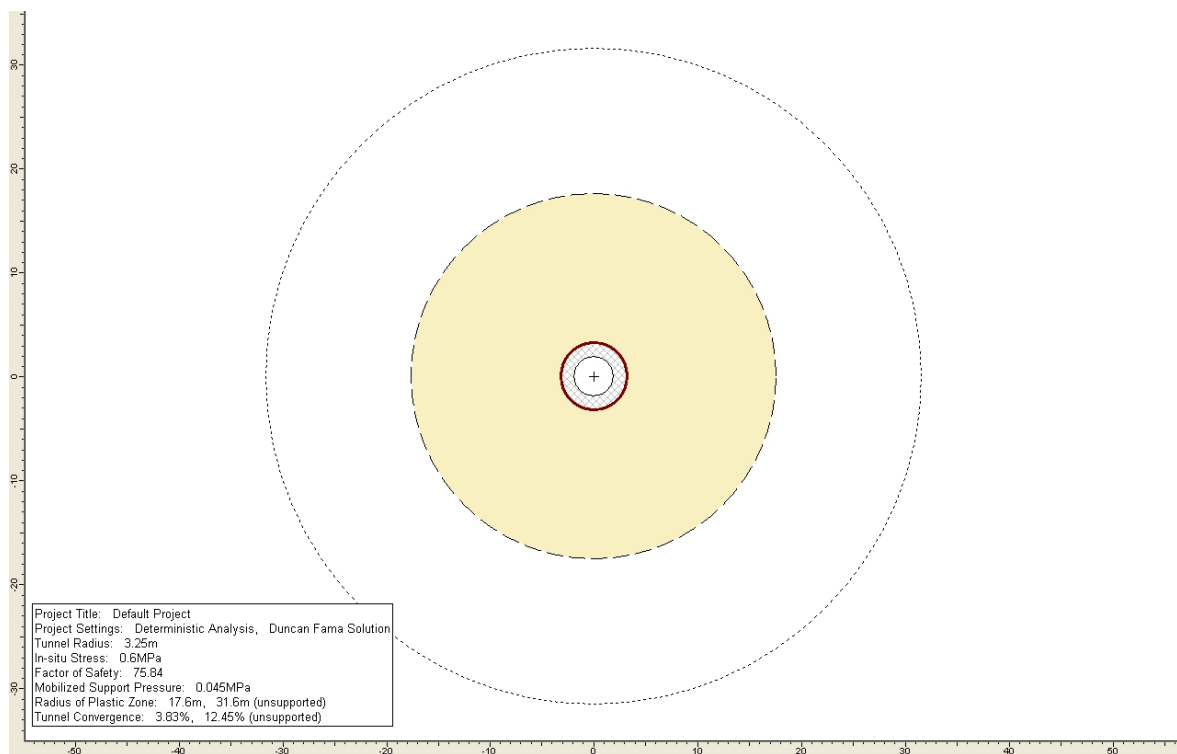


Figura 9.8 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=30m)

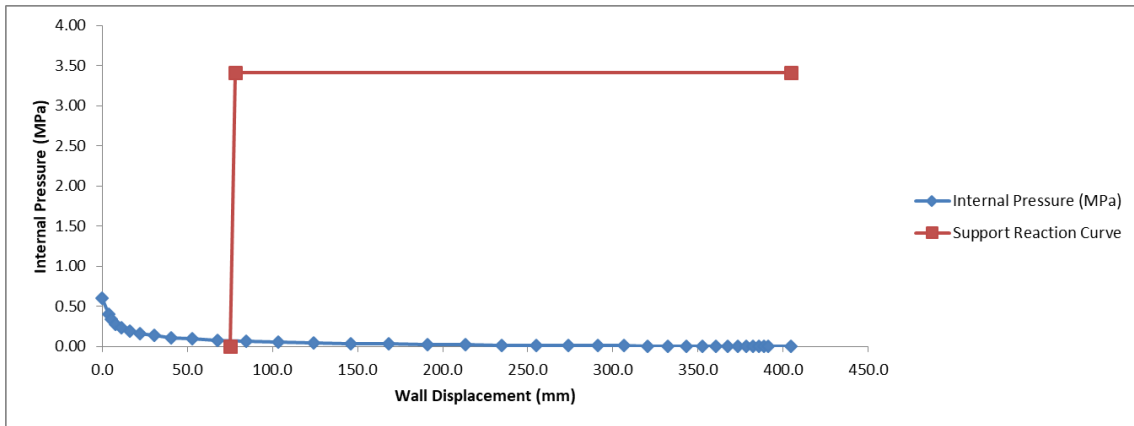


Figura 9.9 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=30m)

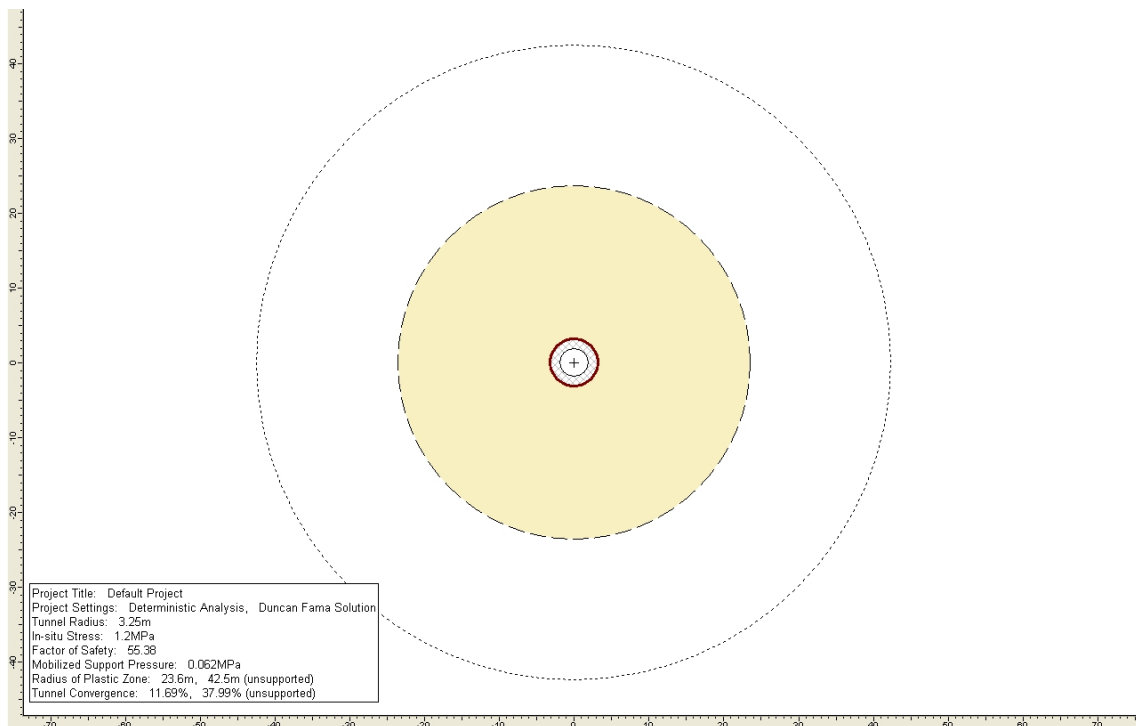


Figura 9.10 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=60m)

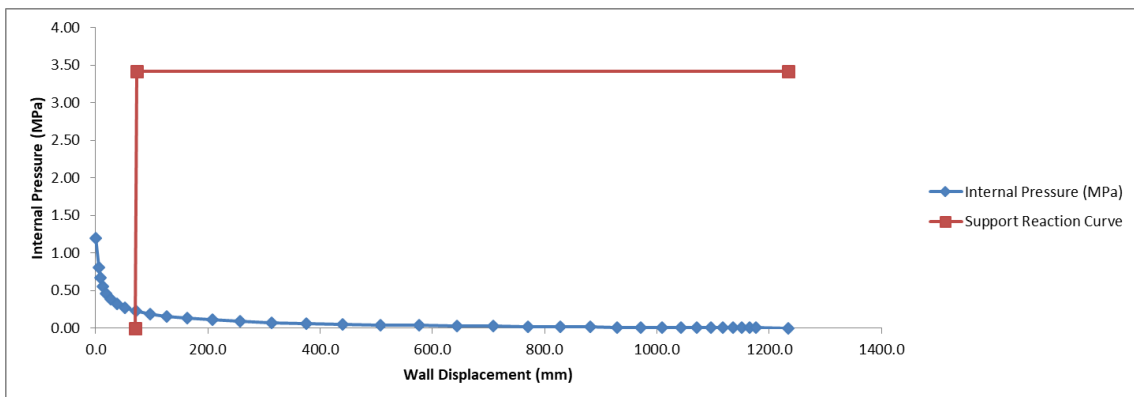


Figura 9.11 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=60m)

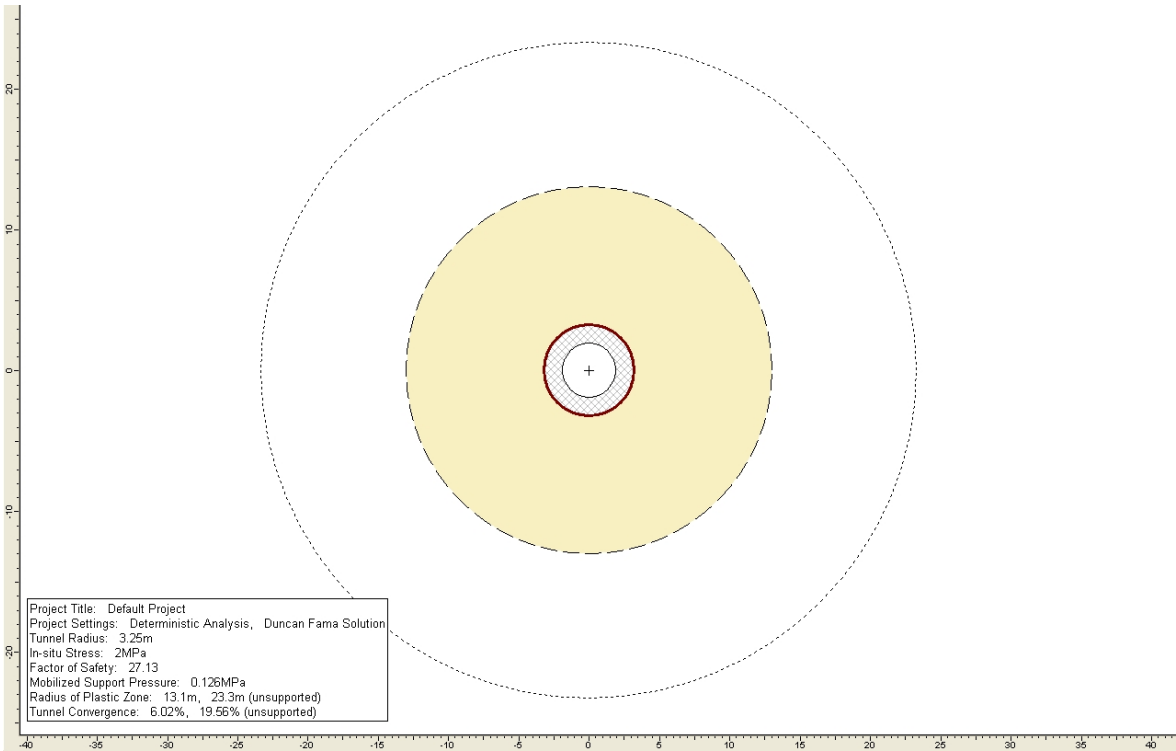


Figura 9.12 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=100m)

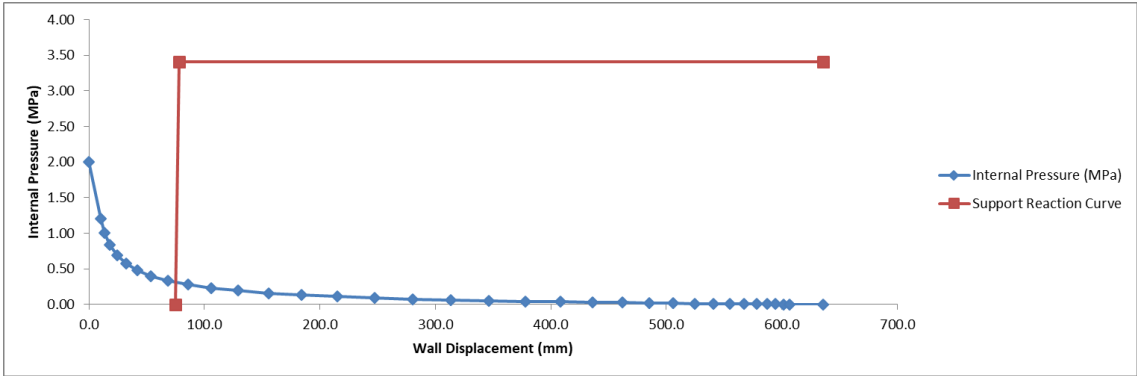


Figura 9.13 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=100m)

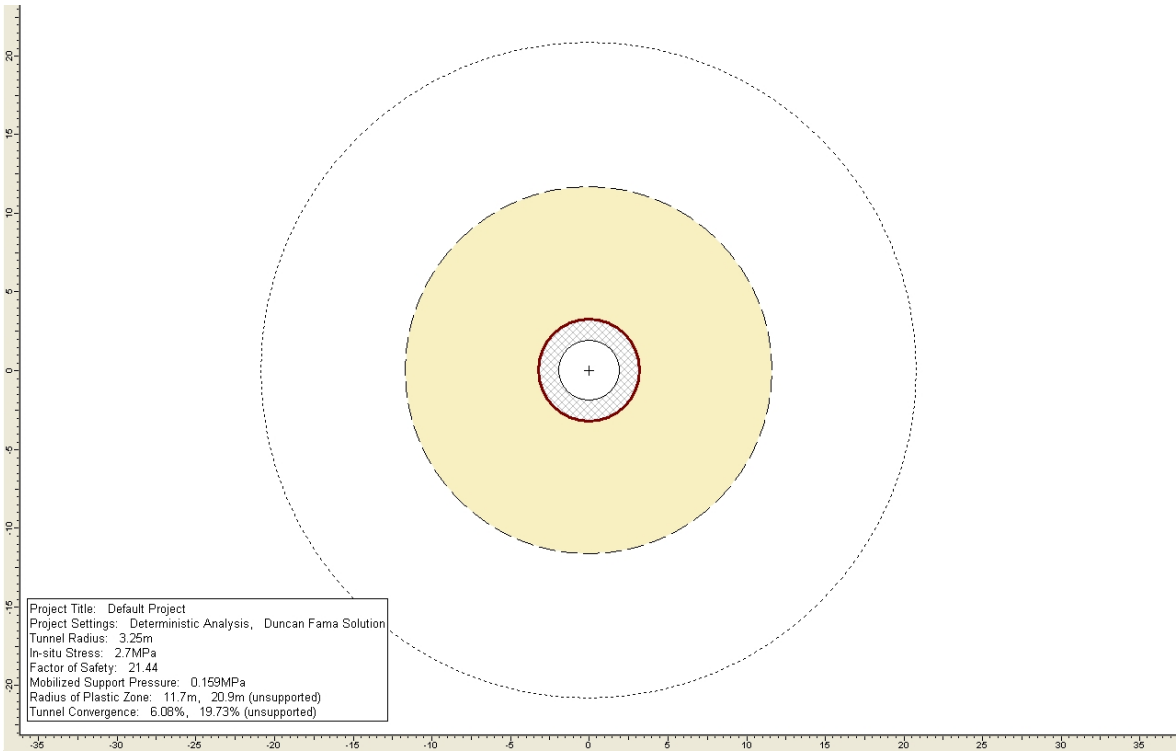


Figura 9.14 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=135m)

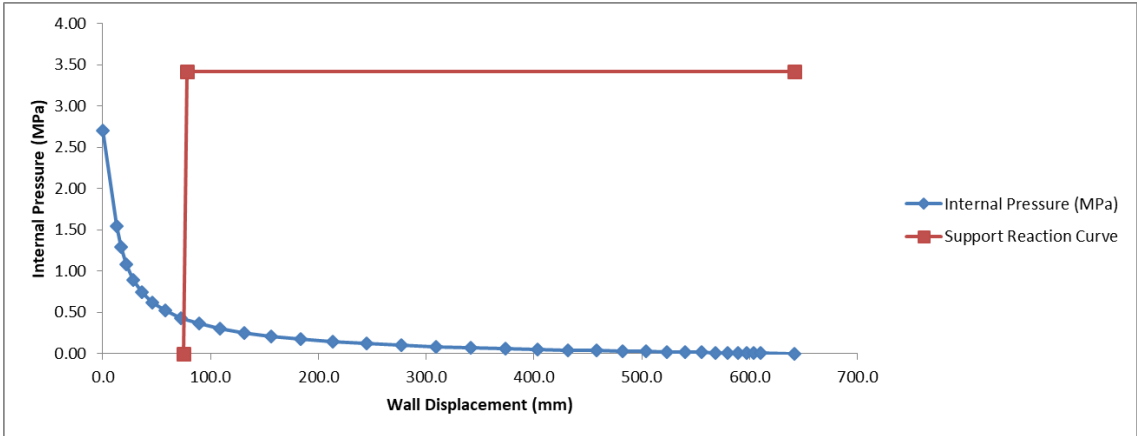


Figura 9.15 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=135m)

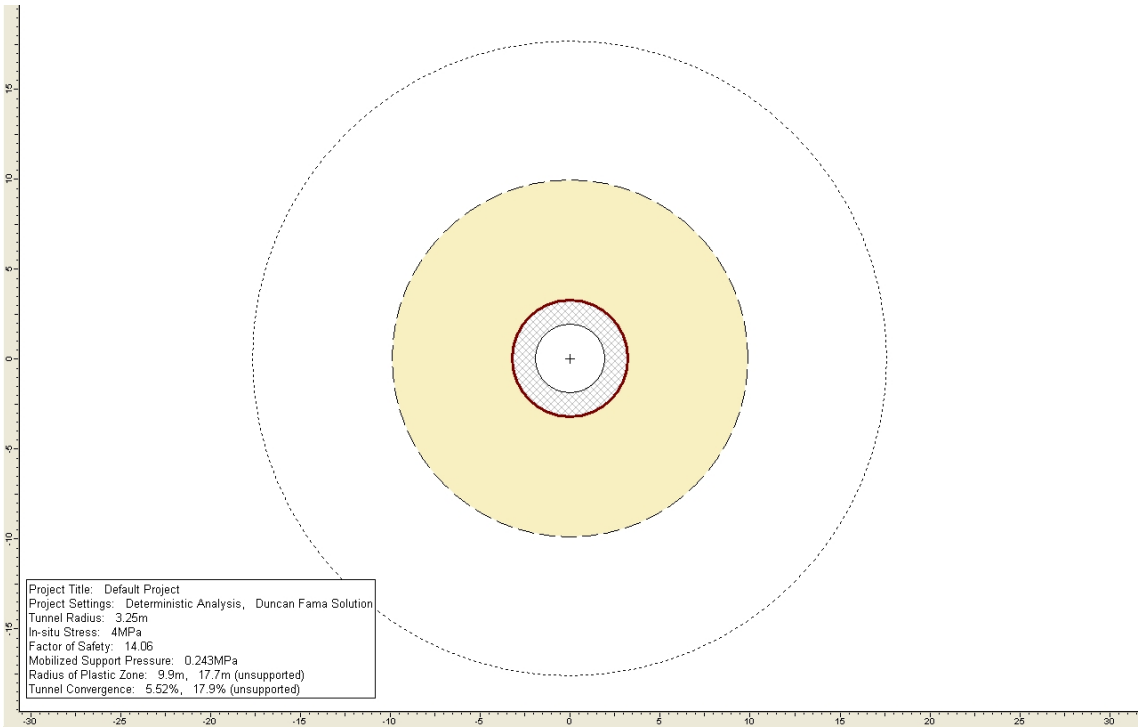


Figura 9.16 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=200m)

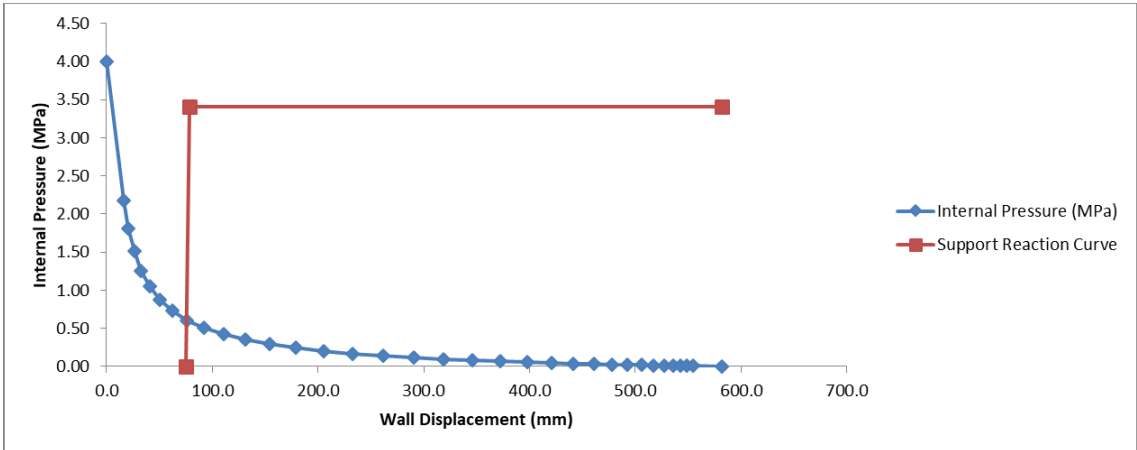


Figura 9.17 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=200m)

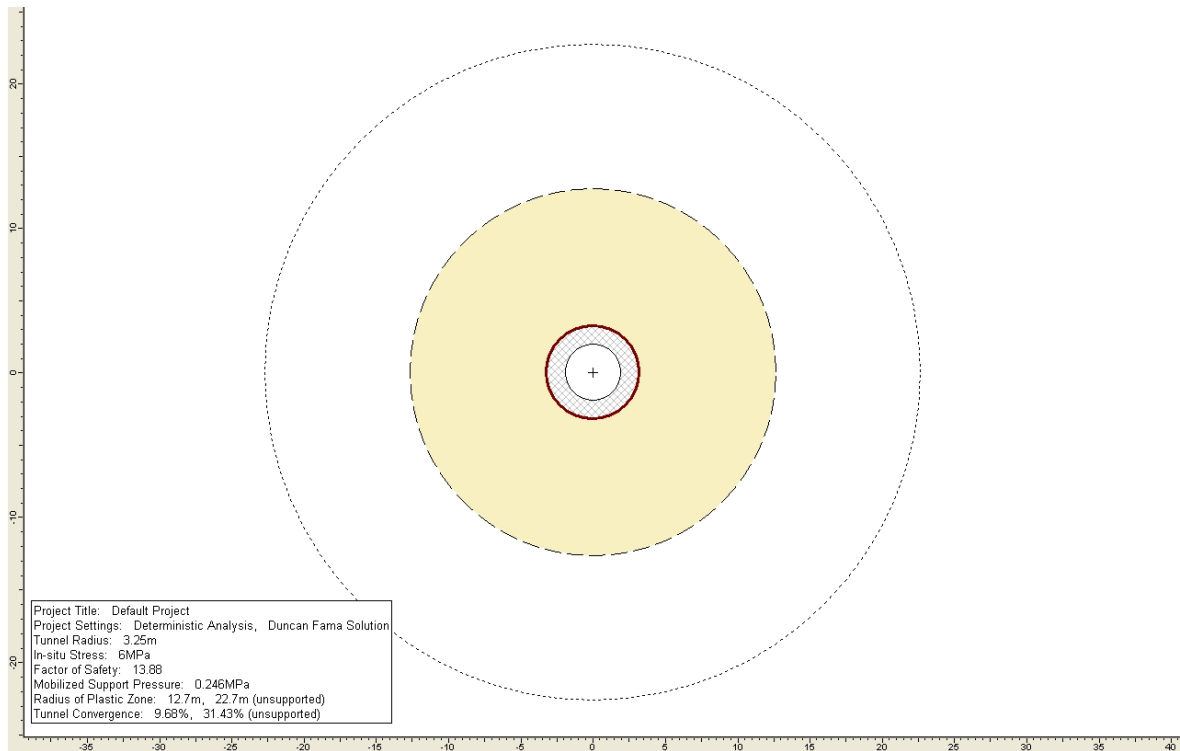


Figura 9.18 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (TRVa - Z=300m)

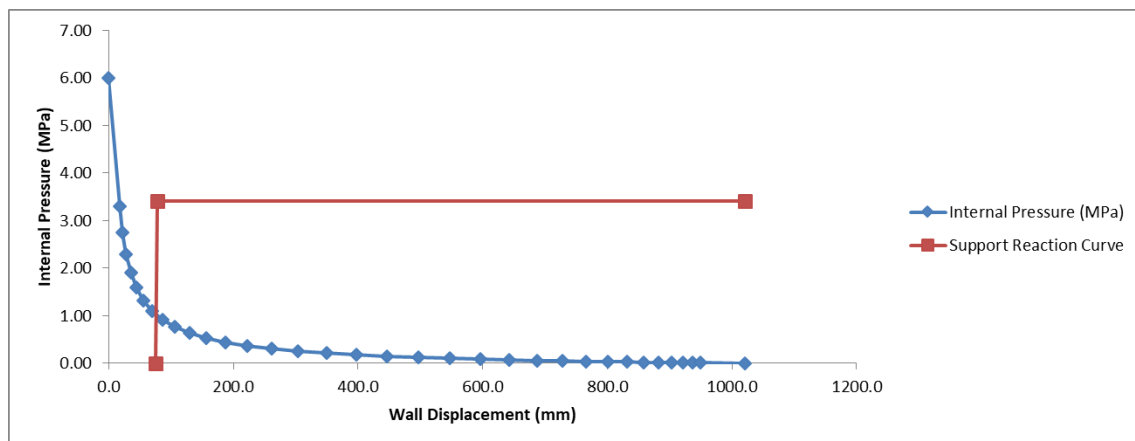


Figura 9.19 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (TRVa - Z=300m)

Come si può osservare dalle immagini riportate sopra:

- La fascia di terreno plasticizzato, nel caso di cavo sostenuto, assume uno spessore massimo di 20.35 m (valutato alla profondità di 60 m) ed un valore minimo di 6.65 m (valutato alla profondità di 200 m). Le maggiori plasticizzazioni del terreno vengono rilevate per le coperture medio basse mentre tendono a diminuire con la profondità. Tale aspetto è correlato al miglioramento dei parametri deformativi e di resistenza ipotizzato con la profondità. L'effettivo comportamento tensio-deformativo degli strati profondi, come si è detto, dovrà essere confermato da ulteriori indagini durante le successive fasi di progetto.

- Le sollecitazioni agenti sul rivestimento della galleria assumono valori modesti nei casi di bassa copertura e valori moderatamente alti nei casi di alta copertura. In tutti i casi esaminati i valori delle sollecitazioni agenti risultano inferiori al valore di resistenza offerto dalla sezione reagente; le verifiche di predimensionamento del supporto possono dunque considerarsi soddisfatte.

9.2.3 Analisi nei Gessi (GTL2) appartenenti alla Serie Evaporitica

Si riportano di seguito i dati di input ed i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sui Gessi (GTL2) appartenenti alla Serie Evaporitica; poiché la galleria in questa formazione mostra una copertura pressoché costante è stata eseguita una sola analisi.

Tabella 9.3 – Galleria idraulica: dati di input per le analisi nelle AV

Sezione di analisi	Copertura (m)	In-Situ Stress (MPa)	Erm (MPa)	σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	m_b	s	α	Rivestimento
GTL1	300	6.04	5837	20	50	8	1.341	0.0039	0.506	30 cm C30/37

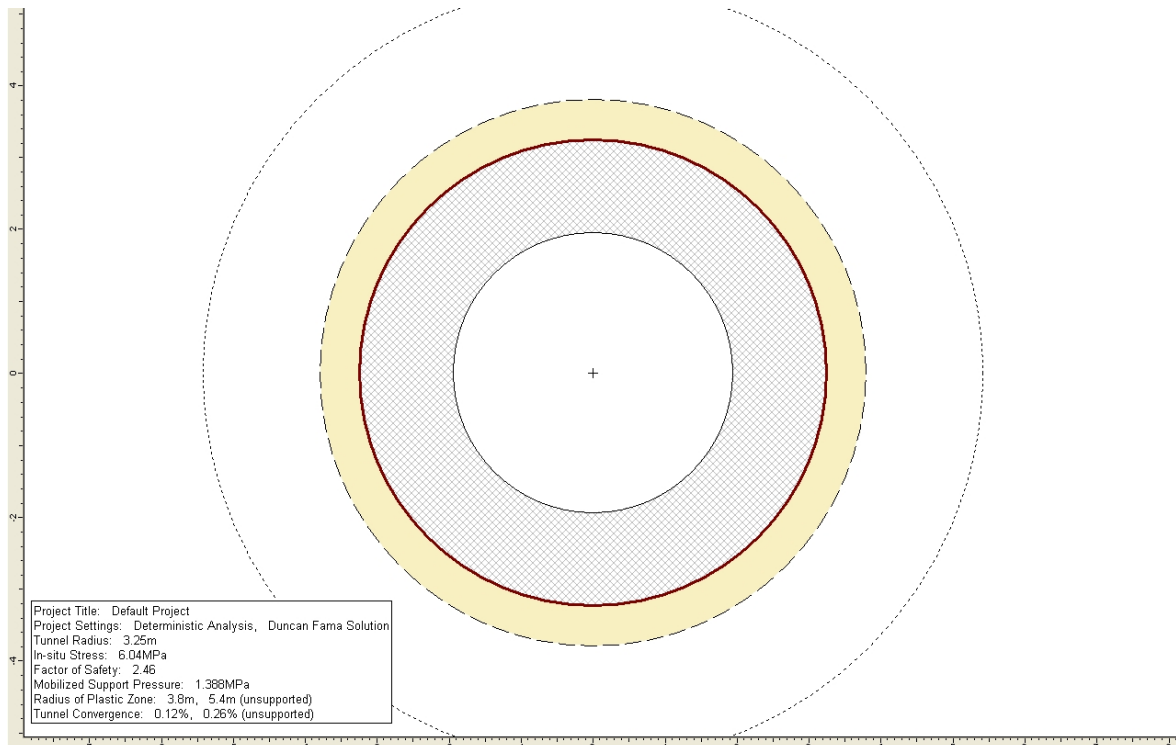


Figura 9.20 – Galleria idraulica: raggio plastico con e senza il rivestimento (GTL2 - Z=300m)

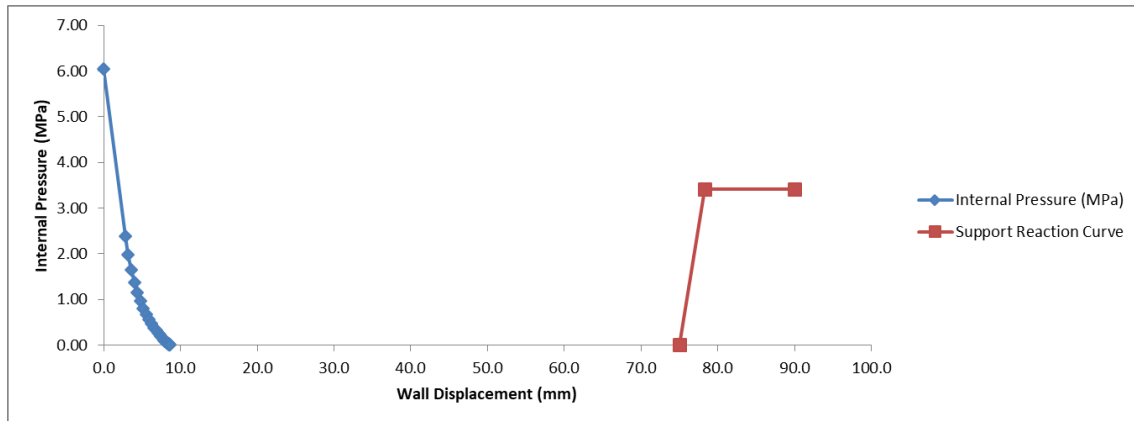


Figura 9.21 – Galleria idraulica: curva caratteristica della galleria e del rivestimento (GTL2 - Z=300m)

Come si può osservare dalle immagini riportate sopra:

- La fascia di terreno plasticizzato assume uno spessore pari a 0.55 m nel caso di cavo sostenuto, e pari a 2.15 m nel caso di cavo non sostenuto
- La convergenza massima della galleria, al rilascio tensionale completo risulta inferiore al sovra scavo generato dallo scudo della TBM, tale aspetto indica la sostanziale stabilità del cavo anche in assenza di rivestimento il quale di conseguenza risulta scarico